



Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Simulación numérica de la formación de una térmica

AUTOR: CELSO PANIAGUA PINERO

Director de proyecto: Javier Rodríguez Rodríguez

Diciembre 2009

ÍNDICE GENERAL

1.	MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	8
1.1.	MOTIVACIÓN.....	8
1.2.	OBJETIVOS	10
2.	INTRODUCCIÓN	13
2.1.	HUMID THERMAL.....	13
2.2.	INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA Y A SU SIMULACIÓN	14
2.2.1.	Características de la turbulencia.....	15
2.2.2.	Simulación de la turbulencia	16
2.2.3.	RANS	18
2.3.	INTRODUCCIÓN A LA PSICROMETRÍA.....	20
3.	ESTUDIO DEL PROBLEMA	24
3.1.	BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DE DOCUMENTACIÓN	24
3.2.	ESTUDIO DEL ARTÍCULO.....	25
3.3.	ESTUDIO DE LAS ECUACIONES	29
4.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA SIMULACIÓN	40
4.1.	INTRODUCCIÓN AL CFD	40
4.2.	INTRODUCCIÓN AL GAMBIT	40
4.3.	INTRODUCCIÓN AL FLUENT.....	41
5.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	43
5.1.	PROBLEMA SECO.....	43
5.1.1.	Geometría del problema	43
5.1.2.	Ecuaciones constitutivas	44
5.1.1.	Condiciones iniciales.....	51
5.1.2.	Condiciones de contorno	53
5.2.	PROBLEMA HÚMEDO	54
5.2.1.	Geometría del problema	54
5.2.2.	Ecuaciones constitutivas	54
5.2.3.	Condiciones iniciales.....	57
5.2.1.	Condiciones de contorno	57
6.	SIMULACIÓN DEL FLUJO.....	59
6.1.	MALLA GAMBIT.....	59
6.2.	IMPLEMENTACIÓN EN FLUENT	60
7.	RESULTADOS	63
7.1.	PROBLEMA SECO.....	63
7.1.1.	Presentación de resultados y análisis.....	63

7.1.2.	Conclusiones parciales	81
7.2.	CASO HÚMEDO	83
7.2.1.	Presentación de resultados y análisis.....	83
7.2.2.	Conclusiones parciales	104
7.3.	RESULTADOS COMPARATIVOS	106
7.4.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CONVERGENCIA	108
8.	CONCLUSIONES GENERALES	112
9.	TRABAJOS FUTUROS	115
10.	RESUMEN.....	118
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	121
12.	ANEXOS.....	124
12.1.	ANEXO A: UDF.....	124
12.2.	ANEXO B: Ajuste función de humedad.....	127
12.3.	ANEXO C: Configuración FLUENT.....	132

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.-	Vuelo a ladera.....	9
Figura 2.-	Onda de montaña.....	9
Figura 3.-	Térmica.....	10
Figura 4.-	Escalas de turbulencia	18
Figura 5.-	Velocidad promedio	19
Figura 6.-	Composición del aire húmedo	21
Figura 7.-	Sistema de referencia	29
Figura 8.-	Dominio de simulación	44
Figura 9.-	Perfil inicial de presiones	52
Figura 10.-	Perfil inicial de temperatura	53
Figura 11.-	Malla computacional	59
Figura 12.-	Contorno inicial de presiones. Caso seco	63
Figura 13.-	Contorno inicial de temperaturas. Caso seco	64
Figura 14.-	Detalle del contorno inicial de temperaturas. Caso seco	64
Figura 15.-	Contorno inicial de densidad. Caso seco	65
Figura 16.-	Detalle del contorno inicial de densidad. Caso seco	65
Figura 17.-	Vectores iniciales de velocidad. Caso seco	66
Figura 18.-	Detalle de los vectores iniciales de velocidad. Caso seco	66
Figura 19.-	Variables fluidas para $t=1.28$ s. Caso seco	68
Figura 20.-	Variables fluidas para $t=9.28$ s. Caso seco	69
Figura 21.-	Variables fluidas para $t=39.28$ s. Caso seco	70
Figura 22.-	Variables fluidas para $t=69.28$ s. Caso seco	71
Figura 23.-	Variables fluidas para $t=99.28$ s. Caso seco	72
Figura 24.-	Variables fluidas para $t=119.28$ s. Caso seco	73
Figura 25.-	Variables fluidas para $t=149.28$ s. Caso seco	74
Figura 26.-	Variables fluidas para $t=159.28$ s. Caso seco	75
Figura 27.-	Variables fluidas para $t=249.28$ s. Caso seco	76
Figura 28.-	Variables fluidas para $t=299.28$ s. Caso seco	77
Figura 29.-	Variables fluidas para $t=349.28$ s. Caso seco	78
Figura 30.-	Variables fluidas para $t=399.28$ s. Caso seco	79

Figura 31.-	Contornos iniciales de presión. Caso húmedo.....	83
Figura 32.-	Contornos iniciales de temperatura. Caso húmedo	84
Figura 33.-	Detalle del contorno inicial de temperatura. Caso húmedo.....	84
Figura 34.-	Detalle del contorno inicial de densidad. Caso húmedo.....	85
Figura 35.-	Contorno de la fracción másica inicial de vapor de agua. Caso húmedo	85
Figura 36.-	Contorno inicial de humedad relativa. Caso húmedo.....	86
Figura 37.-	Vectores iniciales de velocidades. Caso húmedo	86
Figura 38.-	Detalle de los vectores iniciales de velocidades. Caso húmedo	87
Figura 39.-	Variables fluidas para $t=1.28$ s. Caso húmedo	88
Figura 40.-	Variables fluidas para $t=9.28$ s. Caso húmedo	89
Figura 41.-	Variables fluidas para $t=39.28$ s. Caso húmedo	90
Figura 42.-	Variables fluidas para $t=69.28$ s. Caso húmedo	91
Figura 43.-	Variables fluidas para $t=99.28$ s. Caso húmedo	92
Figura 44.-	Variables fluidas para $t=119.28$ s. Caso húmedo	93
Figura 45.-	Variables fluidas para $t=159.28$ s. Caso húmedo	94
Figura 46.-	Variables fluidas para $t=199.28$ s. Caso húmedo	95
Figura 47.-	Variables fluidas para $t=249.28$ s. Caso húmedo	96
Figura 48.-	Variables fluidas para $t=299.28$ s. Caso húmedo	97
Figura 49.-	Variables fluidas para $t=349.28$ s. Caso húmedo	98
Figura 50.-	Variables fluidas para $t=399.28$ s. Caso húmedo	99
Figura 51.-	Contornos de velocidad coloreados según la condensación para $t=259.28$ s....	101
Figura 52.-	Contornos de velocidad coloreados según la temperatura para $t=259.28$ s.....	101
Figura 53.-	Contornos de humedad relativa para $t=259.28$ segundos.....	102
Figura 54.-	Contornos de condensación para $t=259.28$ segundos.....	103
Figura 55.-	Altura de la térmica	107
Figura 56.-	Velocidad de ascenso de la térmica.....	107
Figura 57.-	Residuos de la ecuación de continuidad para el caso seco.....	108
Figura 58.-	Malla computacional para el análisis de sensibilidad.....	109
Figura 59.-	Residuos de la ecuación de continuidad para el análisis de sensibilidad.	110

1

Motivación y objetivos

1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1. MOTIVACIÓN

Según la definición de Wikipedia, la aeronáutica es la ciencia o disciplina relacionada con el estudio, diseño y manufactura de los aparatos mecánicos capaces de elevarse en vuelo, y el conjunto de las técnicas de control de aeronaves. Toda esta ciencia o disciplina se desarrolla en torno a un fenómeno físico, conocido como fuerza de sustentación. Esta fuerza de sustentación se consigue al introducir un ala que se opone al movimiento de una corriente fluida. Ala se denomina a un cuerpo de perfil aerodinámico capaz de generar una diferencia de presiones entre su intradós y extradós al desplazarse por el aire (o si el aire se desplaza sobre ella), lo que a su vez produce la fuerza de sustentación a la que nos referíamos unas líneas más arriba.

Para que el perfil aerodinámico sea capaz de generar la suficiente fuerza de sustentación que permita a la aeronave elevarse, ésta debe tener una determinada velocidad relativa a la corriente de aire. Es por ello que la gran mayoría de aviones modernos, dispone de algún sistema de propulsión que dota a la aeronave de la velocidad necesaria.

Este nos es el caso de los veleros o planeadores. Este tipo de aeronaves no dispone de ningún tipo de propulsión artificial, salvo el que realiza una avioneta remolcadora que la eleva en la atmósfera y posteriormente lo deja libre. El vuelo sin motor (o vuelo a vela), es un deporte aéreo, que consiste en pilotar un velero o planeador para recorrer distancias y elevarse sin más ayuda que los movimientos de las masas de aire en el seno de la atmósfera.

Las modalidades básicas de vuelo a vela son el vuelo a térmica, ladera y onda de montaña.

En el vuelo de ladera, el viento que incide de manera más o menos paralelo a una ladera se ve forzado a subir. Si la ladera tiene la suficiente dimensión y el viento está bien orientado con la fuerza necesaria, un velero situado en posición óptima puede volar apoyado en el viento sin perder altura o incluso subiendo.

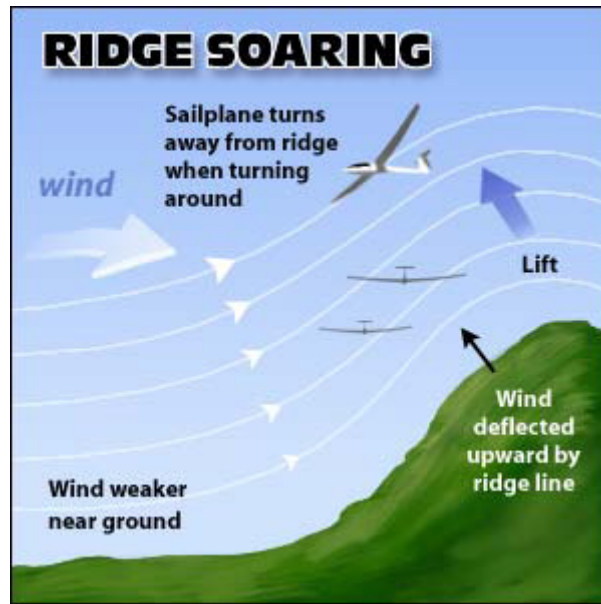


Figura 1.- Vuelo a ladera

La onda de montaña es un fenómeno más complejo que se produce a sotavento de cadenas montañosas sobre las que incide un fuerte viento. Este viento origina un fenómeno ondulatorio más allá de las montañas, en el que en determinadas condiciones se puede volar y alcanzar grandes alturas. Por último.

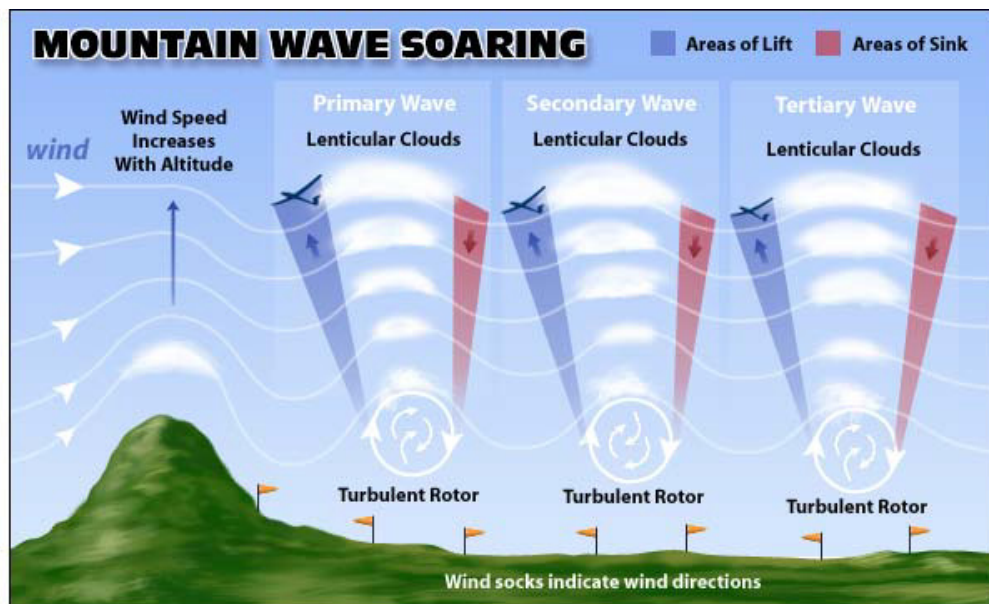


Figura 2.- Onda de montaña

En el vuelo a térmica, corrientes térmicas producidas por el calentamiento diferencial del suelo por el Sol se elevan en la atmósfera, de tal manera que con el planeador buscamos permanecer en su interior para subir (habitualmente, girando dentro de ellas).

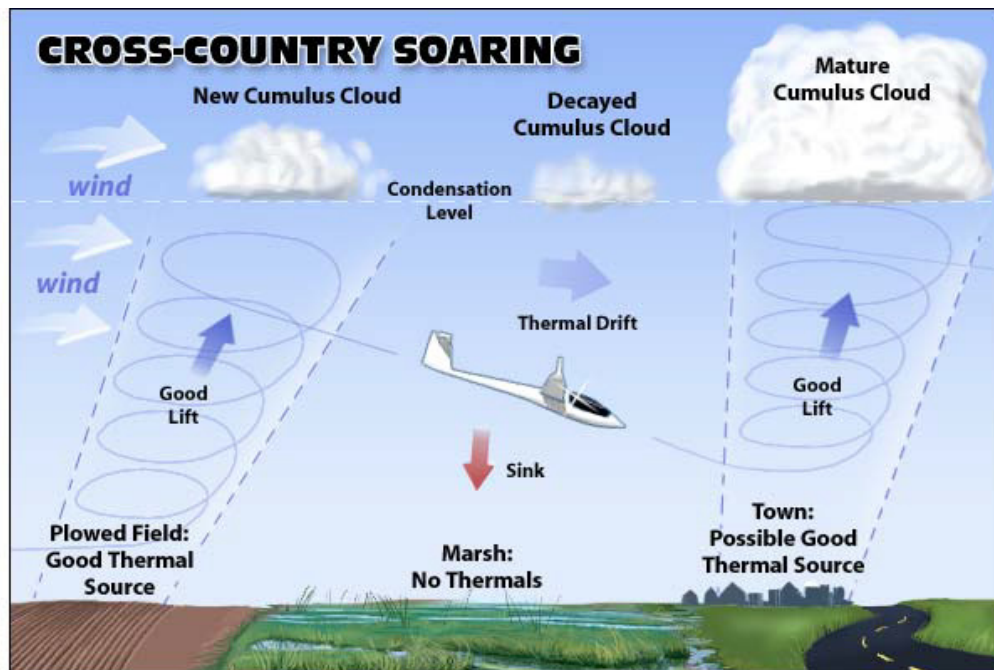


Figura 3.- Térmica

En el proyecto que nos ocupa, nos centraremos especialmente en este último tipo de vuelo, las térmicas. Como ya se ha dicho, las térmicas son corrientes de aire ascendente que se forman en el suelo debido al calentamiento producido por el sol o bien por otro tipo de fuentes de calor, como pueden ser los gases expulsados por una industria o el calor que genera una ciudad. Un proceso importante que se produce dentro de la térmica, es la condensación del vapor de agua presente en el aire húmedo. En principio, esta condensación en agua líquida es vital para el continuo ascenso de la térmica, ya que genera un aporte de calor al flujo que permite que mantenga su diferencia de temperaturas y por lo tanto la diferencia de densidades con el resto de la atmósfera.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto, es el de conseguir comprender mejor el mecanismo de desarrollo del flujo de una térmica, así como mostrar

la forma de hacer las simulaciones y ver que es posible reproducir comportamientos físicos cualitativamente. Para ello, se quiere simular en un código comercial de mecánica de fluidos computacional el flujo y analizar los datos obtenidos, comparándolos con la experiencia acumulada en este tipo de flujos.

Nos fijaremos y analizaremos principalmente dos parámetros de la térmica:

- La altura alcanzada por la térmica en la atmósfera y su velocidad de ascenso
- La humedad del aire, y la importancia de la condensación como mecanismo de aporte de calor a la térmica para su continuo ascenso.

2

Introducción

2. INTRODUCCIÓN

2.1. HUMID THERMAL

Básicamente, y como ya se ha comentado anteriormente, una térmica es una corriente de aire caliente (más cálida que el aire que lo rodea) que asciende a través de la atmósfera.

Una vez explicada coloquialmente, podemos adentrarnos más en las características del flujo y en su desarrollo.

Para que este tipo de flujo se pueda desarrollar, inicialmente es necesario que exista una diferencia de temperatura entre el penacho inicial (caliente) y el resto de la atmósfera (fría). Esta diferencia de temperatura, puede ser originada debido a la acción del sol sobre una carretera, una fábrica que expulsa gases calientes por su chimenea, un núcleo urbano, etc... En el caso de la carretera que alcanza una temperatura superior que sus alrededores (debido a que absorbe mayor cantidad de radiación solar), es necesaria una pequeña inestabilidad en su superficie para que la térmica se lance y empiece a ascender, como puede ser una pequeña corriente de aire al pasar un coche.

Una vez formado el penacho, nos encontramos con la siguiente situación: una masa de aire caliente situada en la parte inferior de la atmósfera fría, que debido a la convección libre producida por la diferencia de densidades bajo la acción de la fuerza de la gravedad, empieza a ascender. Sobre el flujo que rige la ascensión de esta masa de aire caliente y sobre su entorno, podemos especificar aún más sus características:

- **Flujo no estacionario:** claramente, no podemos establecer ningún tipo de patrón temporal que nos permita simplificar el análisis termodinámico. Esto es debido principalmente a las inhomogeneidades de la propia atmósfera
- **Flujo turbulento:** el flujo no es laminar. Su movimiento no se produce de forma ordenada. Las características principales de un flujo turbulento son: tridimensional, no estacionario (ya señalado),

fluctuante e irregular (aparentemente aleatorio), difusivo (mezcla muy efectiva), alta vorticidad. En el capítulo siguiente, se hará un estudio más minucioso de la turbulencia.

- **Composición bifásica/humedad:** la masa de aire, va a estar compuesta en su mayoría de una fase gaseosa y de una pequeña fracción líquida de agua. A su vez, la parte gaseosa estará compuesta de aire y vapor de agua. En definitiva, tendremos en equilibrio termodinámico aire (gas), vapor de agua (gas) y gotas de agua (líquido). Esta humedad, y más concretamente su condensación, va a ser uno de los mecanismos de aporte de energía térmica al flujo, por lo que en principio este va a seguir ascendiendo. Según la térmica de aire se eleve, el contacto con la atmósfera provocará su enfriamiento paulatino. El enfriamiento propiciará que el vapor de agua presente en el aire se vaya condensando en gotas de agua, con la consecuente liberación de calor que este fenómeno provoca.
- **Flujo compresible:** al tratarse principalmente de una mezcla gaseosa compuesta de dos gases que pueden ser modelados como ideales, la densidad de la mezcla variará en función de la temperatura y la presión.
- **Flotabilidad/Convección libre:** ningún mecanismo aparte de la gravedad forzará a la masa de aire a moverse.
- **Atmósfera estratificada:** la atmósfera dentro de la cual va a moverse la térmica de aire está estratificada en cuanto a presión, temperatura y contenido de vapor de agua.

2.2. INTRODUCCIÓN A LA TURBULENCIA Y A SU SIMULACIÓN

Antes de empezar a investigar acerca de cómo vamos a poder simular nuestro flujo, se hace necesaria una pequeña explicación de qué es la turbulencia, cómo se debe tratar y cómo se puede simular.

2.2.1. Características de la turbulencia

- **Tridimensional/No estacionaria:** Turbulencia es el estado del movimiento de un fluido en el que la velocidad, la presión, y otras propiedades del campo fluido varían en el tiempo y el espacio de un modo brusco e irregular. Las fluctuaciones de la velocidad ocurren en las tres direcciones.
- **Fluctuante/muy irregular:** Los flujos turbulentos presentan fluctuaciones muy irregulares de la velocidad, la presión y otras propiedades del campo fluido. La intensidad de las fluctuaciones es variable, pero un valor típico es del 10% o menos del valor medio de la variable. Un registro temporal de la variable en un punto parece una señal aleatoria. Sin embargo, hay cierta estructura en las fluctuaciones y no es riguroso calificarlas de aleatorias.
- **Difusivos/mezcla muy efectiva:** Al igual que los movimientos moleculares aleatorios de un gas son responsables de la difusión viscosa, la difusión térmica y la difusión de materia, un remolino turbulento puede transportar fluido de una región de baja cantidad de movimiento a una región con elevada cantidad de movimiento. Aunque el proceso es más complicado que esto, lo que está claro es que la turbulencia tiende a mezclar el fluido y tiene por ello un efecto difusivo. Los términos *difusión de torbellino* y *difusión turbulenta* se utilizan frecuentemente para distinguir este efecto de la difusión molecular. La difusión turbulenta puede ser 10 o 100 veces superior a la difusión molecular.
- **Amplio rango de escalas de longitud (torbellinos):** Las irregularidades de la velocidad tienen una cierta estructura espacial, formando lo que denominamos *torbellinos*. Éste es un término poco concreto que se aplica a cualquier patrón reconocible en el flujo que persiste por un tiempo corto. Los torbellinos no están aislados unos de otros. Los torbellinos grandes contienen torbellinos pequeños, los cuales a su vez contienen torbellinos más pequeños. Es una de

las principales características de la turbulencia: una distribución continua del tamaño de los torbellinos.

- **Disipativos:** Cualquier flujo con viscosidad tiene disipación viscosa. En los flujos turbulentos ésta es muy importante debido a los gradientes muy pronunciados de velocidad que se dan en los torbellinos de escala más pequeña. La energía disipada en los torbellinos pequeños domina sobre la disipada en los torbellinos más grandes y en flujo medio. Debido a que los torbellinos más pequeños disipan mucha energía y tienden a destruirse ellos mismos, los procesos de cambio de escala que producen torbellinos pequeños a partir de torbellinos grandes son un elemento necesario en la turbulencia auto-sostenible.

Las escalas de estos torbellinos disipativos están bien definidas según la teoría de equilibrio universal de Kolgomorov. Aunque no vamos a entrar en más detalle en el análisis de estas escalas, es necesario hacer referencia a una de las conclusiones a las que se llega al estudiar los tamaños de estos torbellinos. Las escalas más pequeñas de la turbulencia son mucho más pequeñas que las escalas grandes. En resumen, los torbellinos grandes están formados por torbellinos más pequeños que están formados a su vez por torbellinos aún más pequeños.

Tal y como se ha señalado, la *tridimensionalidad* y *no estacionariedad*, junto con el amplio rango de escalas espaciales y temporales, caracterizan los flujos turbulentos. Pero incluso las escalas más pequeñas y con fluctuaciones más rápidas, la micro escala, están aún varios órdenes de magnitud por encima de las escalas moleculares. Se pueden aplicar por tanto las ecuaciones de constitución de la Mecánica de Fluidos para un medio continuo.

2.2.2. Simulación de la turbulencia

Debido a que las fluctuaciones propias de un flujo turbulento pueden llegar a ser de muy pequeña escala y de muy alta frecuencia, resolver el flujo directamente simulando todas las escalas tiene un coste computacional

demasiado elevado, inviable para la mayoría de los estudios ingenieriles. En lugar de ello, las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento del fluido pueden ser promediadas temporalmente, analizadas estadísticamente o sometidas a otro tipo de manipulación con el fin de obviar la simulación de las escalas más pequeñas, obteniendo así un conjunto de ecuaciones modificadas mucho menos costoso computacionalmente hablando de simular.

Actualmente, cuando se decide simular un flujo turbulento, se puede optar por una de las siguientes opciones:

- **DNS (Direct Numerical Simulation):** La simulación directa de las ecuaciones de Navier-Stokes es la manera más evidente y precisa de predecir un flujo turbulento. Se resuelven todas las escalas espaciales y temporales del flujo turbulento sin promediados o aproximaciones. La idea es tan sencilla como difícil de llevar a la práctica debido a su alto coste computacional. En la práctica, su uso queda limitado a geometrías sencillas con números de Reynolds bajos.
- **LES (Large Eddy Simulation):** Una deducción interesante de la famosa teoría de la cascada de Kolmogorov es que los torbellinos grandes dependen de la geometría del flujo, mientras que los vórtices más pequeños son auto-semejantes y tienen un carácter universal. Teniendo en cuenta estas afirmaciones, y dado que las escalas grandes de los flujos turbulentos son las más efectivas en el transporte de propiedades, parece razonable resolver explícitamente los torbellinos grandes y modelar el efecto de los pequeños y más universales vórtices. Esto es precisamente lo que hace una simulación LES. Aún así, este tipo de simulación es exigente en cuanto a capacidad de los ordenadores y al tiempo de cálculo.
- **RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes):** El tipo de aproximaciones que con más frecuencia se utiliza en aplicaciones de ingeniería para predecir flujos turbulentos son los basados en

métodos estadísticos para su estudio. Surgen así los modelos basados en el promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS). En este tipo de ecuaciones, se adopta una aproximación estadística, promediando las ecuaciones de conservación temporalmente durante un periodo de tiempo mucho más grande que el tiempo característico de las fluctuaciones turbulentas. A diferencia de la DNS y la LES, en las RANS se modelan todas las escalas de turbulencia. Todo ello, reduce significativamente el esfuerzo computacional necesario, siendo este tipo de simulación la que utilizaremos para nuestro estudio.

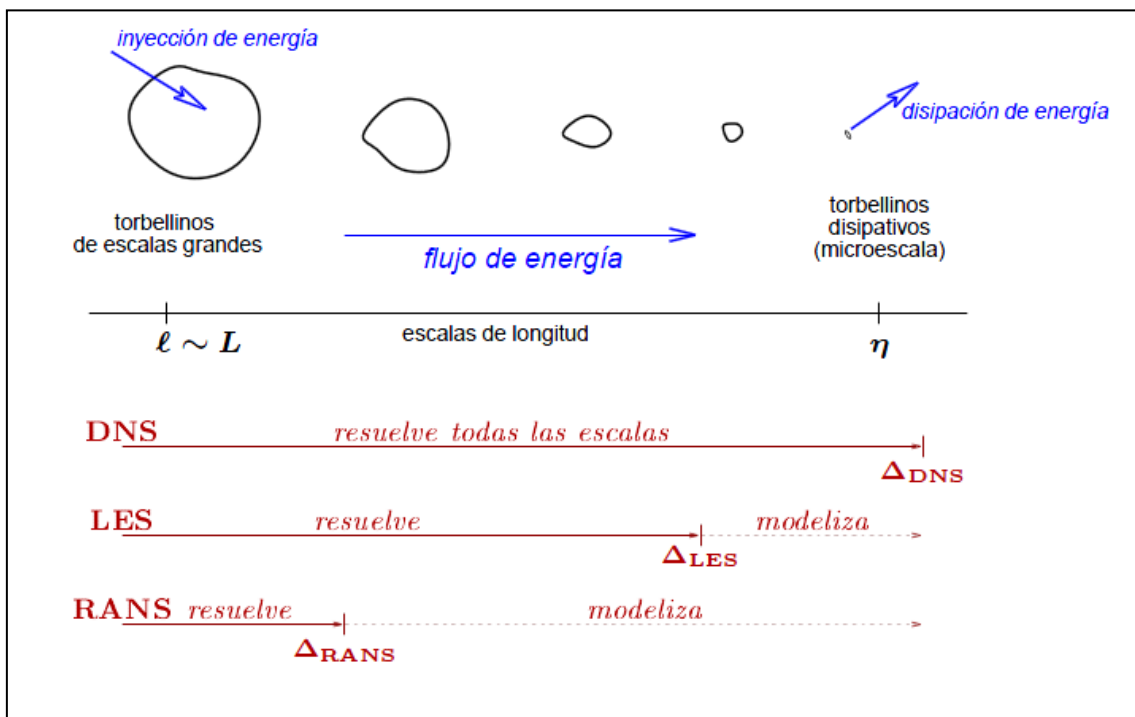


Figura 4.- Escalas de turbulencia

2.2.3. RANS

En los promedios de Reynolds, las variables instantáneas se descomponen en la suma de un valor medio y de una fluctuación. Veamos cómo se hace para la velocidad.

$$u_i(x, t) = \overline{u_i(x)} + u'_i(x, t)$$

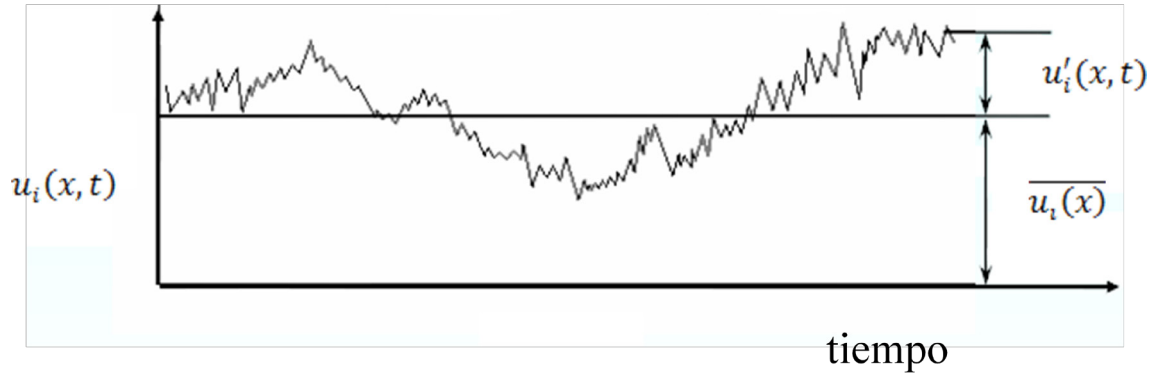


Figura 5.- Velocidad promedio

Análogamente, esta descomposición se realiza para la presión, temperatura y concentración de especies.

Sustituyendo las expresiones de esta forma para las variables fluidas dentro de las ecuaciones instantáneas de continuidad y cantidad de movimiento y tomando promedio temporal (o de conjunto), las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido compresible pueden ser escritas de la siguiente forma (se elimina la barra superior para denotar el valor medio de una variable fluida).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned}$$

Las ecuaciones anteriores son las llamadas RANS. Tienen la misma forma que las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes, con las velocidades y otras variables fluidas expresando promedio temporal (o de conjunto). Ahora aparecen términos adicionales que representan los efectos de la turbulencia. Los esfuerzos de Reynolds, $-\rho \overline{u_i' u_j'}$, deben ser modelados para cerrar la ecuación de cantidad de movimiento. Para ello, se han desarrollado diversos modelos que expresan los términos desconocidos $(\overline{u_i' u_j'})$ en función de las variables conocidas del sistema de ecuaciones $(\overline{u_i})$.

Uno de los métodos más utilizados emplea la hipótesis de la viscosidad turbulenta de Boussinesq para relacionar los esfuerzos de Reynolds con los gradientes de velocidad media.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

La ventaja de esta aproximación, es que el problema de cierre se reduce a calcular la viscosidad turbulenta μ_t .

Según los distintos modelos de turbulencia utilizados, el cálculo de μ_t puede ser más sencillo o más complejo. Se pueden utilizar modelos algebraicos (cero ecuaciones diferenciales adicionales), modelos de una ecuación, o modelos de dos ecuaciones.

En nuestro caso, usaremos el modelo de dos ecuaciones $k - \varepsilon$, que añade dos ecuaciones diferenciales para calcular la viscosidad turbulenta. Estas dos ecuaciones son las ecuaciones de transporte para k y para ε , siendo k la energía cinética turbulenta y ε la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta. En capítulos posteriores, se explicará más detalladamente este modelo, pues como ya veremos, existen diferentes variantes del mismo.

2.3. INTRODUCCIÓN A LA PSICROMETRÍA

La psicrometría es la rama de la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo y del efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y sobre el confort humano.

En nuestro caso, utilizaremos la psicrometría para hacernos una idea de los procesos que ocurren en la condensación del vapor de agua presente en el aire húmedo de la atmósfera.

El aire tiene la capacidad de retener una cantidad variable de vapor de agua en relación a la temperatura del aire. A presión constante, a menor temperatura, menos cantidad de vapor de agua y a mayor temperatura, mayor cantidad de vapor.

Existen varias formas de indicar la humedad. Entre ellas se encuentra la humedad absoluta, la humedad específica o la humedad relativa. Todas las expresiones de humedad son análogas y se pueden transformar de una a otra con relativa facilidad usando determinadas fórmulas o a través del diagrama psicrométrico.

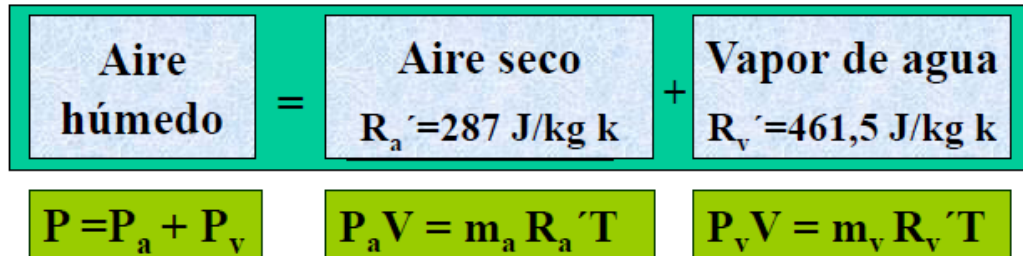


Figura 6.- Composición del aire húmedo

Sea $q_{\text{específica}}$ la humedad específica el cociente entre la cantidad de vapor de agua presente en la unidad de masa de aire húmedo (incluyendo el vapor de agua), y r la relación de mezcla entre el vapor de agua y el aire seco. La expresión que las relaciona a ambas es la siguiente:

$$q_{\text{específica}} = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{aire húmedo}}} = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{aire seco}} + m_{\text{vapor}}} = \frac{1}{\frac{m_{\text{aire seco}}}{m_{\text{vapor}}} + 1} = \frac{r}{1 + r}$$

La humedad relativa es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental. Se expresa en tanto por ciento.

$$HR = \frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{saturación}}}$$

dónde P_{vapor} es la presión parcial del vapor de agua en la mezcla de aire. Ésta se puede obtener a través de la ley de las presiones parciales de Dalton. $P_{\text{saturación}}$ es la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de la mezcla. Una humedad relativa del 100% expresa que el aire ha alcanzado

condiciones de saturación y ya no puede absorber mayor cantidad de vapor de agua, por lo que debe comenzar a condensar.

Para hacer una breve explicación de la condensación, cabe decir que cuando un elemento pasa de estado gaseoso a líquido, libera determinada cantidad de calor en forma de entalpía latente.

3

Estudio del problema

3. ESTUDIO DEL PROBLEMA

3.1. BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DE DOCUMENTACIÓN

Una vez llegados a este punto, nos encontramos ante la siguiente situación. Sabemos que queremos hacer (simular el flujo), pero no sabemos cómo hacerlo. No tenemos experiencia en la simulación de este tipo de flujos, por lo que inicialmente optaremos por informarnos e investigar acerca de lo que han hecho otras personas. Un vistazo rápido a los libros de texto habituales nos hace darnos cuenta de que no existe aparentemente bibliografía sobre ello, por lo que recurriremos a artículos de investigación, buscados a través de la herramienta facilitada por la universidad.

Inicialmente, encontramos un artículo, en el que el autor hace una simulación numérica de una térmica movida por las fuerzas de flotabilidad usando el modelo $k - \varepsilon$ modificado. El artículo en cuestión es el siguiente:

Y. A. Dovgalyuk, M. A. Zatevakhin, and E. N. Stankova, 1993; Numerical Simulation of a Buoyant Thermal Using the k-E Turbulence Model; *Journal of applied meteorology*, volume 33

La idea del estudio y de la simulación numérica es discutir y comprobar el efecto de la curvatura de las líneas de corriente y de la flotabilidad en un proceso turbulento de formación y desarrollo de una térmica de aire. Para ello se usará las dos ecuaciones del modelo $k - \varepsilon$ modificado.

Para nosotros, lo más interesante es el desarrollo y la explicación que hace de las ecuaciones, así como las condiciones de contorno e iniciales que aplica. Aunque bien es cierto, que no tiene en cuenta en la simulación los efectos de la humedad ni de la condensación del vapor de agua contenido en el aire.

Finalmente, conseguimos encontrar un artículo aún más interesante del mismo autor que simula una térmica turbulenta en una atmósfera húmeda usando el modelo $k - \varepsilon$ modificado.

M. A. Zatevakhin, 2001; Turbulent Thermal in a Humid Atmosphere; *High Temperature, volume 39*

La motivación de este nuevo estudio es completar el anterior, investigando el movimiento de grandes térmicas formadas durante fuertes explosiones en atmósferas no homogéneas. De hecho, se basa y se fundamenta en el anterior artículo. La idea es agregar los efectos de la humedad del aire y la condensación de sus partículas de agua.

Será este artículo el que analizaremos en profundidad. Pese a que no podremos aplicar todas las condiciones supuestas en el estudio, es un buen punto de partida para saber por dónde comenzar.

3.2. ESTUDIO DEL ARTÍCULO

El estudio, trata de una investigación numérica de los procesos de transporte y condensación del vapor durante el ascenso de una térmica en una atmósfera compresible. Para ello se usará las dos ecuaciones del modelo k- ϵ modificado con mezcla de dos componentes.

En cuanto al modelo de turbulencia utilizado, se hace especial énfasis en las fuerzas de flotabilidad y en el efecto de la curvatura de las líneas de corriente. Este estudio también cuenta con una ecuación diferencial adicional para el contenido específico de la humedad.

La formulación del problema está realizada en notación tensorial para un fluido compresible. Pasemos al estudio minucioso de las ecuaciones.

HIPÓTESIS

- Las variaciones de densidad son causadas principalmente por variaciones de temperatura.
- El término que describe el flujo de calor turbulento en la ecuación de la energía asume que $dh = \gamma dU$, siendo h la entalpía, γ el exponente adiabático del aire y U la energía interna específica.

- La formulación es válida para bajas concentraciones relativas de vapor.

ECUACIONES:

- **1.-Ecuación de conservación de masa**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Dónde ρ es la densidad y u_i denota las componentes del vector velocidad.

- **2.-Ecuación de conservación de cantidad de movimiento**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) \\ = \rho g_i - \frac{\partial}{\partial x_i} (p) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left(\rho k + \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right) \right] \end{aligned}$$

g_i es la componente del vector de las fuerzas másicas (gravedad); p es la presión; k y ε son la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación viscosa; μ_t es la viscosidad turbulenta, definida como:

$$\mu_t = c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}$$

El último término de la ecuación es la aportación del tensor de esfuerzos viscosos a la conservación del movimiento. Ya que el flujo es principalmente turbulento, es de gran importancia la disipación turbulenta. De hecho, al ser la mezcla tan efectiva, se desprecian los efectos de la viscosidad molecular, teniendo únicamente en cuenta la disipación debida a la viscosidad turbulenta.

- **3.- Ecuación de conservación de energía interna**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U u_j) = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\gamma \mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial U}{\partial x_j} \right) + \rho \varepsilon$$

El segundo y tercer término del lado derecho de la expresión representan la difusión de la energía (calor) debido a la viscosidad y la disipación de la energía debido a la turbulencia.

- **4.- Ecuación de conservación de la energía cinética turbulenta**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = -\frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P + G - \rho \varepsilon$$

La producción P es el producto de los esfuerzos turbulentos por la cortadura del flujo medio. Es el término que transforma parte de la energía del flujo medio en energía cinética turbulenta.

$$P = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

G es el efecto de las fuerzas de flotabilidad. Cabe decir que el valor de G puede ser tanto positivo como negativo. Esto es debido a que las fuerzas de flotabilidad pueden contribuir o no a la generación de turbulencia dependiendo de la estratificación de la atmósfera. Se define como:

$$G = \frac{\mu_t}{\sigma_t \rho \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right)$$

dónde θ es la temperatura potencial o de remanso: $\theta = T(p_0/p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

• **5.- Ecuación de conservación de la tasa de disipación viscosa**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) \\ = -\frac{2}{3}c_{1\varepsilon}\rho\varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon}P + c_{3\varepsilon}G) \\ - (1 - c_c \min(c_c^{-1}, \max(0, Ri_t))) c_{2\varepsilon} \frac{\rho\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

El último término de la ecuación representa el efecto que tiene la curvatura de las líneas de corriente en la turbulencia. El autor del artículo considera que la inclusión de este parámetro es de vital importancia para el desarrollo de flujos que contienen vórtices. Queda por determinar la expresión del parámetro que tiene en cuenta el radio de las líneas de corriente:

$$Ri_t = \frac{k^2}{\varepsilon^2} \frac{|u|}{R_c^2} \frac{\partial(|u|R_c)}{\partial n}$$

siendo R_c el radio de las líneas de corriente; $|u| = (u_i u_i)^{1/2}$; $\partial/\partial n$ es la derivada en la dirección de la normal a lo largo de la línea de corriente.

• **6.- Ecuación de conservación de la humedad específica**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho q) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho q u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_q} \frac{\partial q}{\partial x_j} \right)$$

Sea q el contenido de humedad específica.

Para cerrar el problema, aún quedan por definir varias ecuaciones de estado, que no estudiaremos aquí por no ser de nuestro interés las aplicadas en el artículo. Más adelante definiremos nuestras propias ecuaciones de estado. Por último, queda determinar el valor de las constantes aparecidas en la formulación del problema.

$\sigma_t=0.9$; $\sigma_k=1$; $\sigma_\varepsilon=1.3$; $c_c=0.2$; $c_\mu=0.0748$; $c_{1\varepsilon}=1.45$; $c_{2\varepsilon}=1.9$; $c_{3\varepsilon}=-0.6$ si $G<0$ y $c_3=1.9$ si $G>0$;

3.3. ESTUDIO DE LAS ECUACIONES

Una vez vistas las ecuaciones del modelo matemático, vamos a proceder a su análisis y a su estudio en profundidad. Una práctica habitual en Mecánica de Fluidos para simplificar las ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes, es hacer un análisis de órdenes de magnitud para eliminar términos que son poco significativos y contribuyen de escasa manera al desarrollo del flujo.

Pese a que el código comercial FLUENT que utilizaremos para implementar las ecuaciones y simular el flujo nos permite incluir los efectos de todos los términos de las ecuaciones diferenciales arriba expuestas, es interesante comprender un poco más de la “física” del problema eliminando términos no significativos y comprobando posteriormente su contribución al flujo en la simulación. Acometamos ahora el análisis de órdenes de magnitud.

MAGNITUDES CARACTERÍSTICAS

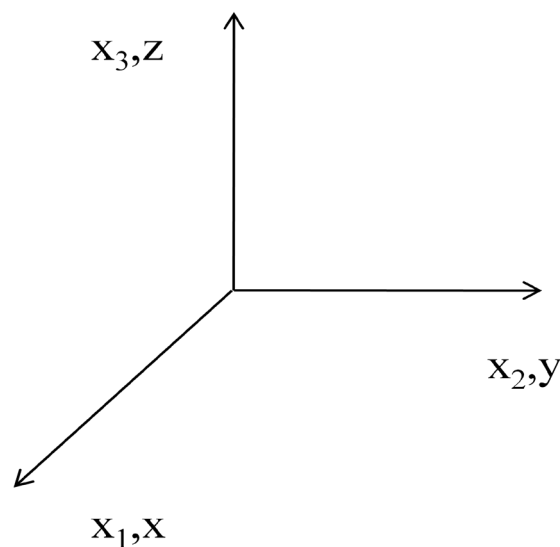


Figura 7.- Sistema de referencia

Definamos ahora las magnitudes características del problema. Hace falta tener en cuenta que estamos en coordenadas cartesianas y el flujo axil-simétrico.

- **Longitud:**

$$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3) = (x, y, z)$$

$x, y \sim D$, siendo D el diámetro inicial de la térmica

$z \sim H$, siendo H la altura inicial de la térmica

- **Velocidad:**

$$\vec{v} = (u_1, u_2, u_3) = (u, v, w)$$

$v, u \sim V$, siendo V la velocidad tangencial

$w \sim W$, siendo W la velocidad de ascensión de la térmica

- **Tiempo:**

$t_c \sim \frac{H}{W}$, siendo t_c el tiempo característico de ascensión de la térmica

- **Densidad:**

$\rho \sim \rho_\infty$, siendo ρ_∞ la densidad del aire lejos de la térmica

- **Energía interna:**

$U \sim c_v T$, siendo U la energía interna de un gas, c_v el calor específico a volumen constante y T la temperatura del gas

- **Energía cinética turbulenta:**

$k \sim V^2$, siendo k la energía cinética turbulenta característica

- **Tasa de disipación viscosa:**

$\varepsilon \sim \frac{V^3}{D}$, siendo ε la tasa de disipación viscosa característica

Inicialmente, haremos la suposición de que las variaciones de densidad son muy pequeñas respecto a la propia densidad del fluido. Es decir;

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \ll 1$$

Parece factible hacer esta suposición, ya que unas de las hipótesis del modelo era que las pulsaciones de densidad eran provocadas únicamente por variaciones de temperatura. En nuestro estudio, la atmósfera y la térmica se encuentran en condiciones muy estables, donde las únicas variaciones de temperatura se van a producir por la estratificación de la propia atmósfera y por el aporte de calor de la condensación del vapor de agua presente en el aire. Si suponemos, por ejemplo, una variación de 2K, estando la térmica a unos 27 °C;

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \frac{2K}{300K} = \frac{1}{150} \ll 1$$

En flujos movidos por la convección natural donde la densidad es función únicamente de la temperatura, es habitual aplicar el modelo de Boussinesq, es decir, considerar la densidad constante en todas las ecuaciones, salvo en el término de flotabilidad presente en la ecuación de cantidad de movimiento. Esta es una de las conclusiones a las que queremos llegar con nuestro estudio. Anticipándonos a los resultados obtenidos, se puede adelantar que no podremos aplicar dicho modelo al flujo, ya que si bien el modelo es aplicable a la térmica en sí, no lo es al intentar aplicarlo a todo el dominio, donde las variaciones de densidad son importantes debido a la estratificación propia de la atmósfera.

Nota: Pese a no ser técnicamente muy riguroso, es posible que en algún momento mezclemos la notación tensorial y la conservativa en una misma ecuación para hacer más sencillo su análisis

ECUACIONES:

- **1.-Conservación de masa:**

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla(\vec{v}) + \vec{v} \nabla(\rho) = 0$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{u}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{v}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{t_c} \quad \left(\frac{V}{D} \quad \frac{W}{H} \right) \quad \left(\frac{V}{D} \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \frac{W}{H} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = 0$$

Comparemos ahora los términos temporales y de variación de la densidad con los de la divergencia de la velocidad.

$$\frac{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}}{\frac{\partial w}{\partial z}} \sim \frac{\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{t_c}}{\frac{W}{H}} = \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{W}{H}}{\frac{W}{H}} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \ll 1$$

$$\frac{\frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\frac{\partial w}{\partial z}} \sim \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{W}{H}}{\frac{W}{H}} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \ll 1$$

$$\frac{\frac{u}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}}{\frac{\partial u}{\partial x}} \sim \frac{\frac{V}{D} \frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{V}{D}} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \ll 1$$

Efectivamente, y como cabía esperar, podemos eliminar de la ecuación de conservación de masa los términos de las variaciones temporales y espaciales de la densidad, ya que son despreciables frente a las variaciones espaciales de la velocidad (divergencia). La ecuación se reduce a:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \rightarrow \nabla(\vec{v}) = 0$$

$$\frac{V}{D} \sim \frac{W}{H}$$

- **2.-Conservación de cantidad de movimiento en i :**

En vez de desarrollar por completo la ecuación de cantidad de movimiento, iremos estudiando cada término por separado para facilitar el análisis de órdenes de magnitud. A partir de ahora, no se indicará explícitamente que la divergencia de la velocidad es igual a cero.

Término temporal:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = \rho \frac{\partial}{\partial t}(u_i) + u_i \frac{\partial}{\partial t}(\rho) \sim \rho \frac{\partial}{\partial t}(u_i)$$

Término convectivo:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = u_i \left(\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right) + \rho u_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = u_i \nabla(\rho \vec{v}) + \rho u_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \sim \rho u_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

Término de la energía cinética turbulenta:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{2}{3} \rho k \right) = \frac{2}{3} \left(\rho \frac{\partial k}{\partial x_i} + k \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) \sim \frac{2}{3} \rho \frac{\partial k}{\partial x_i}$$

Término viscoso:

Sea la viscosidad turbulenta ya vista.

$$\mu_t = c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}$$

dónde c_μ es una constante de orden unidad. El siguiente desarrollo se obtiene de aplicar derivadas parciales.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \\
&= c_\mu \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right) = \mu_t \left(\nabla^2 u_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \nabla(\vec{v}) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \nabla(\vec{v}) \right) \\
&\approx c_\mu \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \mu_t (\nabla^2 u_i)
\end{aligned}$$

Con lo que la ecuación de cantidad de movimiento en la coordenada i queda:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \rho u_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \\
&= \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial k}{\partial x_i} \\
&\quad + c_\mu \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right)
\end{aligned}$$

- **3.-Conservación de la energía interna:**

Antes de ponernos a realizar el análisis de los términos significativos de esta ecuación, primero debemos fijarnos en que no conocemos como son las variaciones de la energía interna específica respecto a la propia energía interna específica. Por ejemplo, suponiendo una variación térmica de 2 K.

$$U = c_v T; \Delta U = c_v \Delta T$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta T}{T} \approx \frac{2K}{300K} = \frac{1}{150} \ll 1$$

Luego se deduce que las variaciones de energía interna específica son despreciables frente a la propia energía interna específica.

Término convectivo:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U u_j) = \rho U \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U) \sim u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U)$$

Término viscoso:

Sea γ el coeficiente adiabático y σ_t otra constante de orden unidad.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\gamma \mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial U}{\partial x_j} \right) = \frac{\gamma}{\sigma_t} \rho c_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial U}{\partial x_j} + \frac{\gamma \mu_t}{\sigma_t} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_j^2} \right)$$

Luego la ecuación de la energía interna queda:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U) = \frac{\gamma}{\sigma_t} \rho c_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial U}{\partial x_j} + \frac{\gamma \mu_t}{\sigma_t} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_j^2} \right) + \rho \varepsilon$$

- **4.-Conservación de la energía cinética turbulenta:**

Para llevar a cabo el análisis de órdenes de magnitud, hace falta tener en cuenta que las variaciones de k son del mismo orden que k .

Término temporal:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) = \rho \frac{\partial}{\partial t}(k) + k \frac{\partial}{\partial t}(\rho) \approx \rho \frac{\partial}{\partial t}(k)$$

Término convectivo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) &= \rho k \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + u_j \left(\frac{\partial \rho k}{\partial x_j} \right) \approx u_j \rho \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + u_j k \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) \\ &\approx u_j \rho \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \end{aligned}$$

Término viscoso:

Sea σ_k otra constante de orden unidad.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\gamma \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \frac{\gamma}{\sigma_k} \rho c_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\gamma \mu_t}{\sigma_k} \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} \right)$$

Producción:

La producción P es el producto de los esfuerzos turbulentos por la cortadura del flujo medio. El es término que transforma parte de la energía del flujo medio en energía cinética turbulenta. Así mismo, también se puede simplificar haciendo el correspondiente análisis de órdenes de magnitud.

$$P = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \approx \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = P^*$$

De esta forma, y teniendo en cuenta que las fuerzas de flotabilidad no se pueden simplificar, la ecuación para la energía cinética turbulenta queda:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (k) + u_j \rho \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \frac{\gamma}{\sigma_k} \rho c_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\gamma \mu_t}{\sigma_k} \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} \right) + P^* + G - \rho \varepsilon$$

- **5.-Conservación de la tasa de disipación viscosa**

Idénticamente que para la ecuación de k , las variaciones de ε son del mismo orden que ε .

Término temporal:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) = \rho \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\rho) \approx \rho \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon)$$

Término convectivo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) &= \rho \varepsilon \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + u_j \left(\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial x_j} \right) \approx u_j \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + u_j \varepsilon \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) \\ &\approx u_j \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \end{aligned}$$

Término viscoso:

Sea σ_ε otra constante de orden unidad.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\gamma \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \frac{\gamma}{\sigma_\varepsilon} \rho c_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\gamma \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_j^2} \right)$$

La ecuación de conservación de la tasa de disipación viscosa queda:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon) + u_j \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \\ = \frac{\gamma}{\sigma_\varepsilon} \rho c_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\gamma \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_j^2} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P^* + c_{3\varepsilon} G) \\ - (1 - c_c \min(c_c^{-1}, \max(0, Ri_t))) c_{2\varepsilon} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

• 6.-Conservación de la humedad específica

En esta última ecuación solo se van a realizar las simplificaciones ya conocidas de la densidad frente a variables cuyas variaciones sean del orden de sí mismas. En cuanto a la humedad específica, no podemos afirmar que sus variaciones respecto de sí misma sean mucho menores que la unidad, por lo que en este caso evitaremos las simplificaciones.

Término convectivo:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho q u_j) = \rho q \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + u_j \left(\frac{\partial \rho q}{\partial x_j} \right) \approx u_j \rho \left(\frac{\partial q}{\partial x_j} \right) + u_j q \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right)$$

Término viscoso:

Sea σ_q otra constante de orden unidad.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\gamma \mu_t}{\sigma_q} \frac{\partial q}{\partial x_j} \right) = \frac{\gamma}{\sigma_q} \rho c_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} + \frac{\gamma \mu_t}{\sigma_q} \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_j^2} \right)$$

Luego finalmente la ecuación queda:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho q) + u_j \rho \left(\frac{\partial q}{\partial x_j} \right) + u_j q \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) = \frac{\gamma}{\sigma_q} \rho c_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} + \frac{\gamma \mu_t}{\sigma_q} \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_j^2} \right)$$

Con el análisis realizado ya tenemos una idea de las ecuaciones, la física y la importancia relativa de cada término en el desarrollo del flujo. Hemos visto que prácticamente el fluido puede considerarse incompresible (salvo en el ya mencionado término de las fuerzas de flotabilidad que rige el movimiento) al tener unas variaciones de densidad muy pequeñas. Por lo tanto, podemos concluir que la hipótesis de Boussinesq se puede aplicar a este caso sin ningún miedo a estar eliminando efectos que tengan una relativa importancia sobre el desarrollo del flujo.

4

Fundamentos teóricos de la simulación

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA SIMULACIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN AL CFD

El uso de la experiencia acumulada y de las relaciones empíricas, utilizadas históricamente, no puede hacer frente con la suficiente rapidez a los cambios que obligatoriamente han de producirse por necesidades económicas, energéticas y ambientales. En este punto, donde apoyándose en la veloz evolución de los ordenadores, aparecen modelos numéricos computacionales que tratan de modelar el problema para ser capaces de ofrecer, de una manera rápida y segura, una respuesta a las cuestiones que se plantean.

La simulación numérica de problemas complejos aparece como una solución válida, siempre y cuando los resultados obtenidos no se separen de los conocidos teórica o experimentalmente. La rama de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos de cálculo para resolver y analizar problemas de flujos continuos (fluidos) es la dinámica de fluidos computacional o CFD (“computational fluid dynamics”).

El asunto más importante en mecánica de fluidos computacional es cómo transformar un fluido continuo en un modelo discreto para que pueda ser interpretado y simulado en un ordenador. Uno de los métodos más extendidos consiste en discretizar el dominio espacial en pequeñas celdas para dar lugar a una malla, y posteriormente aplicar un algoritmo conveniente para resolver las ecuaciones del movimiento oportunas en cada una de las celdas, pudiendo así obtener el valor de cualquier variable en cada una de las celdas en las que se ha dividido el dominio.

4.2. INTRODUCCIÓN AL GAMBIT

GAMBIT es un preprocesador integrado para análisis de mecánica de fluidos computacional. Se puede usar GAMBIT para construir la geometría del problema y generar una malla estructurada o no estructurada sobre él, para que posteriormente un programa de CFD la lea y pueda resolver las ecuaciones del modelo designado en la malla creada por GAMBIT.

En nuestro caso, el uso que haremos de GAMBIT es muy básico, ya que la geometría del problema es muy elemental (es un rectángulo) y la malla generada será totalmente estructurada. Cabe decir que el programa permite gran flexibilidad y una gran cantidad de posibilidades. Se puede desde descomponer geometrías en mallas totalmente estructuradas, hasta dejar que se cree una malla hexaédrica desestructurada automáticamente. También se pueden generar mallas de muy alta calidad triangulares o tetraédricas, así como mallas que contengan prismas y pirámides.

4.3. INTRODUCCIÓN AL FLUENT

FLUENT es un programa computacional CFD de propósito general para modelar flujos, turbulencia, transferencia de calor, reacciones químicas y muchos otros tipos de flujos para aplicaciones industriales, desde el flujo de aire a través del ala de un avión, pasando por el proceso de combustión en un motor, hasta la resolución de problemas con ondas acústicas. Usando FLUENT se pueden analizar rápidamente problemas complejos de mecánica de fluidos, incluso si no se posee experiencia previa en CFD o programación. FLUENT permite aplicar métodos de simulación computacional para caracterizar, resolver y analizar problemas prácticos de diseño.

El programa incorpora técnicas modernas de modelado y un amplio rango de modelos físicos para simular numerosos tipos de problemas de fluidos. Estas técnicas se presentan de un modo accesible para el usuario gracias al uso de interfaces gráficas para la definición del problema, el cálculo y el pos procesamiento de los resultados. Además, aunque no es específicamente su cometido, permite manipular y afinar las mallas que importa de otros programas.

5

Definición del problema

5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Una vez entendido físicamente el problema a través de las ecuaciones del artículo analizado, llega el momento de empezar a definir nuestro “propio” caso, que aunque intentaremos se asemeje lo más posible al problema estudiado, será inevitable que o bien por utilizar un código comercial, o bien por razones puramente físicas, acabe siendo el problema resuelto no demasiado semejante al estudiado.

Para nuestro estudio, se va a llevar a cabo la simulación de dos casos distintos. El primero con aire como único fluido y otro con un fluido mezcla de otros tres (aire, vapor de agua y agua líquida)

Cabe decir que el problema “húmedo” consta de una fase primaria gaseosa compuesta de dos fluidos diferentes (aire y vapor de agua) y una fase secundaria líquida compuesta únicamente de agua.

5.1. PROBLEMA SECO

5.1.1. Geometría del problema

Dicho esto, lo primero que debemos empezar a definir es el dominio de cálculo y de simulación.

Por ser la atmósfera libre lo que queremos representar en nuestro campo fluido, la geometría de nuestro problema será la que se muestra en la figura. El dominio tiene unas dimensiones de 11.000 metros de altura y 5.000 metros de ancho. La elección de la altura es debida a que a los 11.000 metros se encuentra la tropopausa. Desde el suelo hasta dicha capa de la atmósfera el gradiente de temperatura es constante y tiene un valor de $-6,5 \text{ K/km}$. En cuanto a la anchura del dominio, se ha tenido en cuenta que el radio inicial de la térmica (colocada en la esquina inferior izquierda en el instante inicial) será de 500 metros. Cabe decir, que el problema será resuelto axil-simétricamente, con el eje de simetría situado en la frontera izquierda del dominio.

En la figura 8 se puede ver la geometría del problema.

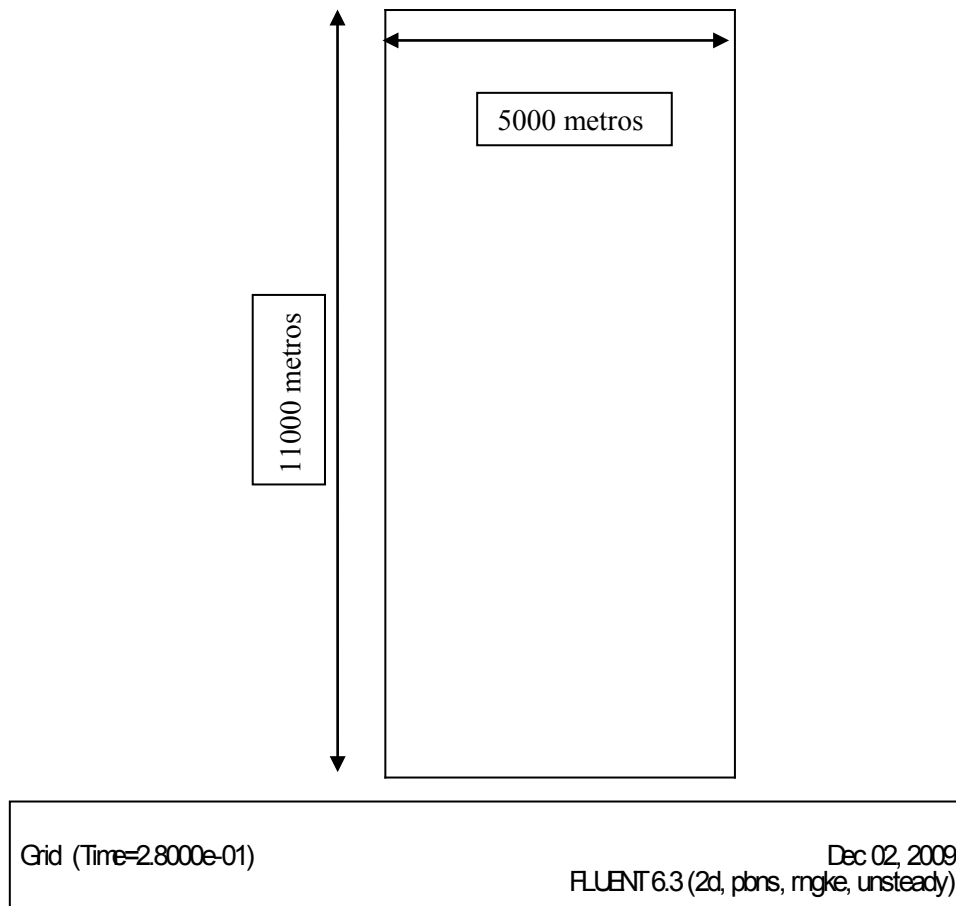


Figura 8.- Dominio de simulación

5.1.2. Ecuaciones constitutivas

Una vez definida la geometría, llega el momento de implementar las ecuaciones que ya conocemos en el código comercial FLUENT. Para ello, nos atendremos a las posibilidades que este nos marca y haremos caso de las directrices que aparecen en su propia documentación.

Pese a encontrarnos en la definición del problema seco (aire como único fluid), las ecuaciones aquí presentadas se formulan para un posible fluido multifásico, siendo totalmente válidas para un único fluido. Se opta por esta formulación para no tener que definir unas ecuaciones constitutivas para cada uno de los problemas.

Ecuaciones de conservación

Para todos los flujos, FLUENT resuelve las ecuaciones de conservación de masa y de momento. Además, una vez activada la opción correspondiente, también resuelve la ecuación de la energía. Las ecuaciones que a continuación se muestran, son válidas para un amplio rango de flujos compresibles e incompresibles, laminares y turbulentos, estacionarios y transitorios.

Una vez llegado a este punto, FLUENT nos ofrece tres posibilidades para modelar un flujo multifásico con dos o más de sus fases continuas. El modelo “VOF model” (volumen of fluid), el “Mixture model” y el “Eulerian model”. Rápidamente, eliminamos el “VOF model” ya que está diseñado para fluidos inmiscibles, característica que no nos sirve. La siguiente alternativa es la del “Mixture model”, el cual está diseñado para dos o más fases (fluidas o discretas) y permite que las fases interpenetren entre ellas, es decir, se mezclen de manera homogénea. El siguiente modelo que nos ofrece FLUENT es el “Eulerian model”. Básicamente es un modelo más completo y complejo que el “Mixture model”, y permite varias características que nuestro caso no nos son necesarias. Para transporte neumático (nuestro caso) de fases continuas, FLUENT recomienda el “Mixture model”.

Por lo tanto, el modelo elegido para la simulación del flujo multifásico es el “Mixture model”. Este lleva a cabo una aproximación como si fuera un único fluido con las propiedades de la mezcla. Básicamente, este modelo resuelve 4 ecuaciones: las ecuaciones de continuidad, momento y energía para la mezcla, y la ecuación de la fracción volumétrica la resuelve para cada una de las fases secundarias. Además, se deben tener en cuenta un par de posibilidades que nos da este modelo:

- El modelo permite que las fases sean interpenetrantes entre sí. Las fracciones volumétricas α_q y α_p pueden tomar cualquier valor entre 0 y 1, dependiendo del espacio ocupado por la fase q y la fase p .

- El modelo también permite que las fases se muevan a distintas velocidades entre sí. Como nosotros no deseamos este efecto, simplemente desactivaremos esta posibilidad.

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}) = S_m$$

El término fuente S_m es la masa que se pueda añadir debida a los procesos de transferencia de masa entre fases (como pueda ser la condensación del vapor de agua) o a fuentes definidas por el usuario. La densidad media de la mezcla ρ_m se define como:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$$

α_k es la fracción volumétrica de la fase k , y n es el número de fases presentes en la mezcla.

Momento:

$$\frac{\partial (\rho_m \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v} \vec{v}) = -\nabla(p) + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho_m \vec{g} + \vec{F}$$

dónde p es la presión estática y $\bar{\bar{\tau}}$ el tensor de esfuerzos, descrito a continuación. \vec{F} representa las fuerzas másicas externas, aunque también contiene otros términos fuente dependientes del modelo elegido, como pudieran ser los efectos de la turbulencia en la ecuación de conservación del momento.

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu_m \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]$$

Energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k E_k \rho_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v} (E_k \rho_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h$$

dónde k_{eff} es la conductividad efectiva ($\sum \alpha_k (k_k + k_t)$), donde k_t es la conductividad térmica turbulenta, definida acorde con el modelo de turbulencia elegido). El primer término del lado derecho se corresponde con la transferencia de energía debida a la conducción. S_h incluye los efectos de reacciones químicas o cualquier tipo de fuentes de calor volumétricas (como es la transferencia de calor entre el vapor de agua y su fase líquida debida a la condensación). La energía E se define como:

$$E_k = h_k + \frac{p}{\rho_k} + \frac{v^2}{2}$$

para una fase compresible, y como $E_k = h_k$ para una fase incompresible, dónde la entalpía sensible h_k es la entalpía sensible de la fase k definida para los gases ideales como.

$$h = \sum_j Y_j h_j$$

En la ecuación anterior, Y_j es la fracción másica de la especie j , y

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$$

con una temperatura de referencia T_{ref} de 298.15 K.

Fracción Volumétrica:

De la ecuación de continuidad para la fase secundaria p , se tiene:

$$\frac{\partial \alpha_p \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}) = \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq})$$

dónde \dot{m}_{qp} es la transferencia de masa de la fase q a la fase p y \dot{m}_{pq} es la transferencia de masa de la fase p a la fase q.

Ecuaciones de estado

Para poder cerrar completamente la formulación numérica del problema (a falta de definir el modelo de turbulencia), es necesario describir las propiedades del fluido que van a tomar parte en las ecuaciones enunciadas previamente.

En nuestro caso, gran parte del estudio y del análisis realizado sobre el artículo se basaba en aplicar la hipótesis de Boussinesq a las ecuaciones, despreciando todas las variaciones de densidad salvo las presentes en las fuerzas de flotabilidad (las que rigen el movimiento del fluido). El objetivo de este análisis, aparte de para comprender mejor la física de nuestro problema, se realizó para eliminar dichos términos no importantes, y así hacer más ligera la simulación con un menor esfuerzo computacional. Ahora bien, tras varias simulaciones realizadas, y adelantándonos a los resultados obtenidos, al implementar la densidad del aire como un fluido que sigue la hipótesis de Boussinesq la térmica no ascendía lo que se esperaba. De hecho, aún estando más caliente la térmica que su entorno, ésta dejaba de ascender, un fenómeno que se antojaba erróneo. La explicación que se dio a este hecho, es que si bien las variaciones de densidad (y de temperatura) son muy pequeñas dentro de la térmica y la hipótesis de Boussinesq sigue siendo aplicable, no ocurre lo mismo en la atmósfera, cuya estratificación de temperaturas permite una disminución en la densidad del aire según se asciende que no resulta despreciable. De esta manera, y como el fluido de la térmica es el mismo que el del resto de la atmósfera, se optó por hacer que la densidad del aire siguiera una ley de gas ideal.

Densidad:

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{\frac{R}{M_w} T}$$

dónde p_{op} es la presión operativa y p es la presión local relativa calculada por FLUENT.

El resto de propiedades son constantes para cada fluido por separado. En el caso de la fase gaseosa, se computan las propiedades como las de una mezcla perfecta homogénea.

Modelo de turbulencia

En cuanto al modelo de turbulencia, tenemos claro que ésta será modelada mediante un sistema de dos ecuaciones diferenciales κ - ε , que es la solución que se adopta en el caso estudiado en el capítulo 3. El problema que nos surge es que FLUENT nos ofrece tres métodos diferentes para resolver flujos turbulentos con el modelo de dos ecuaciones κ - ε (Standard, RNG y Realizable).

Tras consultar la documentación, el modelo elegido es el modelo de turbulencia RNG κ - ε . Este modelo fue desarrollado usando una rigurosa técnica estadística (llamada “Re-normalization Group”) para tener en cuenta los efectos de las escalas más pequeñas del movimiento. Es especialmente útil para simular flujos con “swirl” (en nuestra térmica, es esperable cierta cantidad de vorticidad). Otro punto muy importante es que permite aplicarse a regiones de bajo número de Reynolds. Además, tras un análisis minucioso de las ecuaciones de este modelo, nos damos cuenta que es el que más se asemeja de los tres a las ecuaciones resueltas en el problema estudiado.

Por tanto, las ecuaciones resueltas en la simulación y mostradas a continuación son las correspondientes al modelo de turbulencia RNG κ - ε .

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + c_{3\varepsilon} G_b) - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \end{aligned}$$

G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes principales de velocidad.

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a las fuerzas de flotabilidad, que para gases ideales se reduce a

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

dónde Pr_t es el número de Prandtl turbulento para la energía y g_i es la componente i -ésima del vector gravitacional.

Y_M representa la contribución de los efectos de la compresibilidad sobre la disipación de la turbulencia

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2$$

siendo M_t el número de Mach turbulento, definido como

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$$

dónde a es la velocidad del sonido.

α_k y α_ε son los números inversos efectivos de Prandtl para κ y para ε respectivamente. Así como los números de Prandtl están fijados en el modelo κ - ε standard, la teoría RNG permite calcularlos en función del número de Reynolds a través de la viscosidad molecular y efectiva local.

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}}$$

dónde $\alpha_0=1.0$

La viscosidad efectiva μ_{eff} , debido a la modificación del modelo RNG resulta en su cálculo a través de la siguiente ecuación diferencial:

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v}$$

$$\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}; C_v \approx 100$$

El último término que queda por describir es R_ϵ . Este término incluido en la ecuación de ϵ modela los efectos que tienen la curvatura de las líneas de corriente en la turbulencia.

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$$

Dónde $\eta \equiv Sk/\epsilon$, $\eta_0 = 4.38$ y $\beta = 0.012$

Por último, sólo quedan por definir las constantes del modelo RNG usadas en las ecuaciones. Los valores usados por defecto en FLUENT son:

$$C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68$$

Como se puede comprobar, las ecuaciones y constantes proporcionadas por FLUENT para resolver un flujo turbulento usando la teoría RNG se asemejan a las ecuaciones resueltas en el artículo estudiado. Además, FLUENT recomienda el uso de esta teoría, ya que su validez está altamente contrastada con datos experimentales y se puede aplicar a un amplio tipo de flujos gracias a la modificación que tiene para modelar eficientemente la viscosidad a bajos números de Reynolds. Para mayor seguridad, también modela (aunque de manera ligeramente distinta) el efecto que tiene la curvatura de las líneas de corriente sobre la turbulencia.

5.1.1. Condiciones iniciales

Para poder empezar la simulación, debemos inicializar el campo fluido y proporcionar las condiciones para el instante inicial.

La distribución de presiones se obtiene de considerar la atmósfera en reposo, fijar la presión de 101325 en el suelo y considerar el aire como un gas ideal, de manera que el descenso de la presión al subir en la atmósfera es debido a que hay una “columna” de aire menor.

$$P(z) = 101325 * (1 - 22.557 * 10^{-6} \cdot z)^{5.256} Pa$$

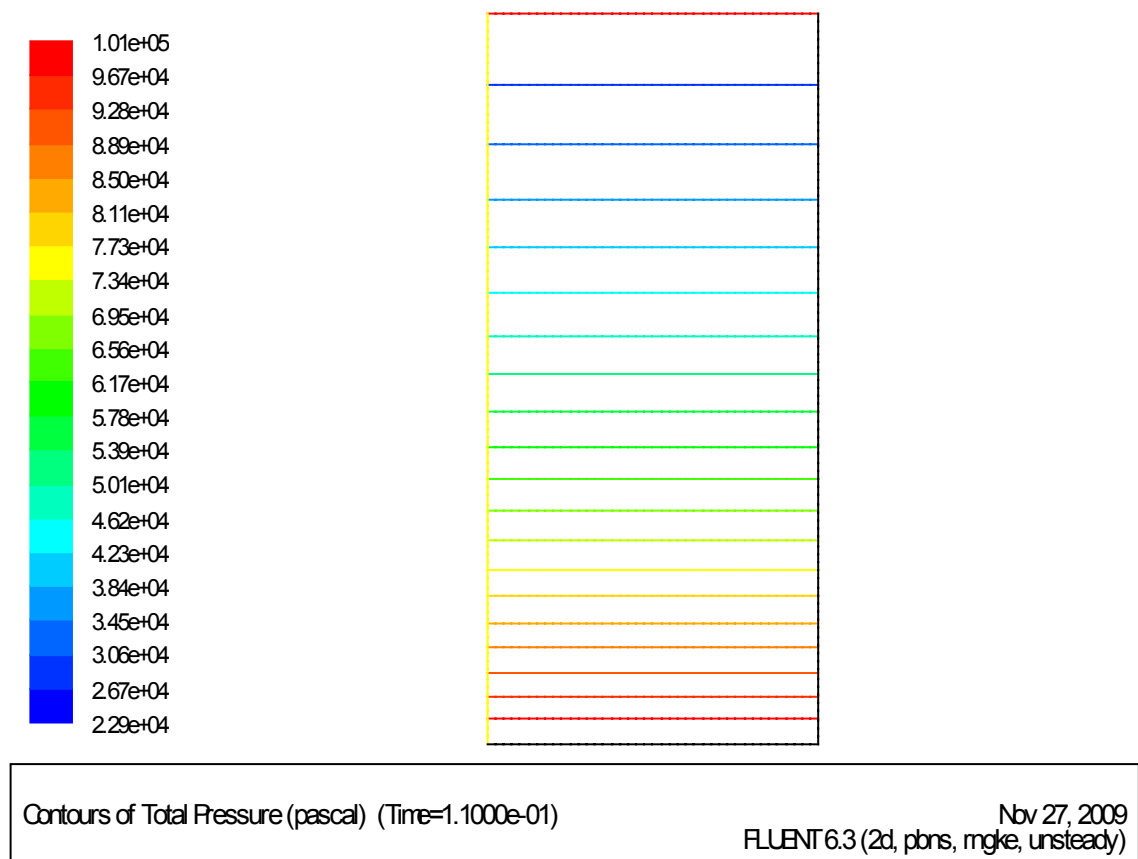


Figura 9.- Perfil inicial de presiones

La temperatura sigue la distribución de la atmósfera estándar, la cual decae 6.5 K por cada 1000 m que se ascienda.

$$T(z) = 288.15K - \frac{6.5}{1000} \frac{K}{m} z$$

Juntos con el gradiente de temperatura en la atmósfera, se inicializa una semiesfera más caliente que su entorno de radio 500 metros a una temperatura de $T=293.15\text{K}$ en la esquina inferior izquierda, que representa la térmica. El resto de las propiedades de la térmica son idénticas a las de la atmósfera.

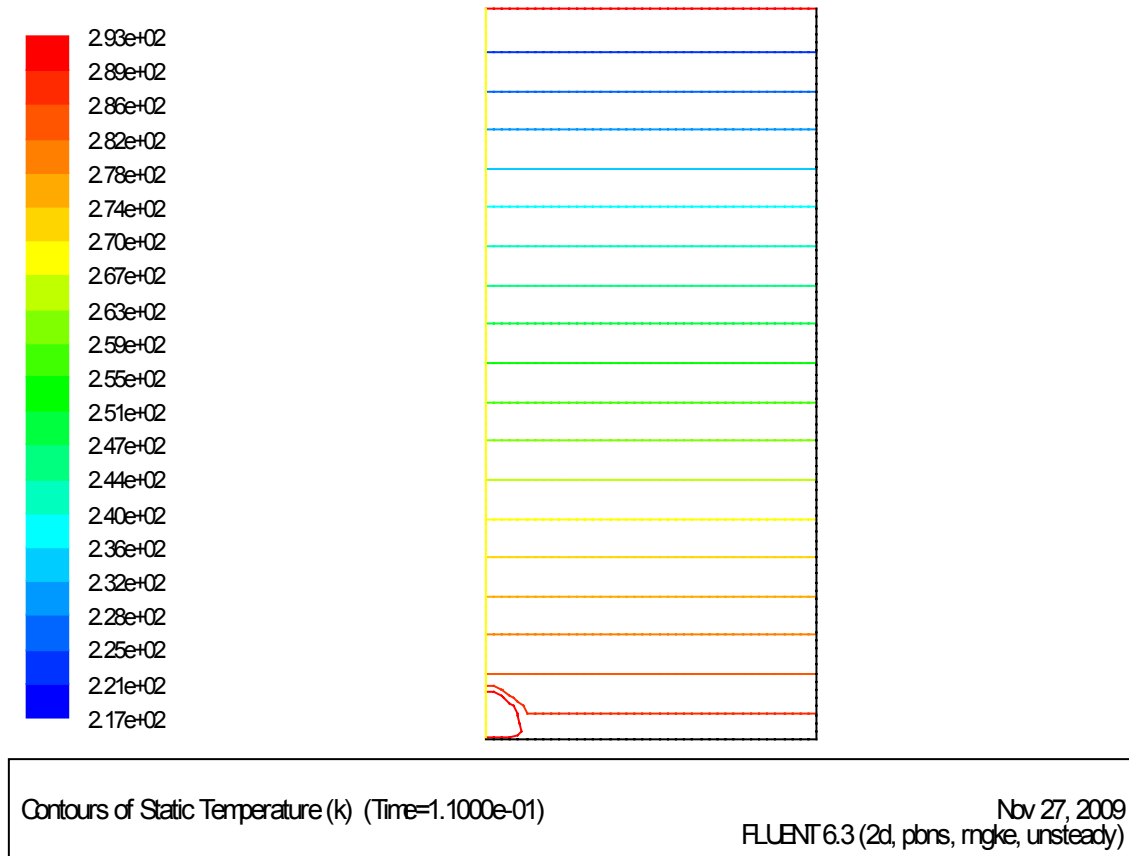


Figura 10.- Perfil inicial de temperatura

El flujo es inicializado en reposo, es decir, no existe ningún tipo de movimiento en el momento inicial. Para los parámetros iniciales de turbulencia, son escogidos los valores de una atmósfera estándar, es decir: $k = 0.07 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\varepsilon = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$.

Se establece una gravedad de -9.81 m/s^2 .

5.1.2. Condiciones de contorno

Como todo problema de carácter diferencial, se deben añadir ciertas condiciones a las ecuaciones principales para que el problema pueda quedar

cerrado. Las condiciones de contorno definen lo que le ocurre al fluido en las fronteras exteriores del dominio de simulación. En nuestro problema, tenemos cuatro fronteras:

- **Izquierda:** Dado que el flujo es axil-simétrico, la frontera izquierda es el eje de simetría.
- **Superior:** La frontera superior está situada a 11000 metros, y tiene implementada como condición de contorno “PRESSURE OUTLET”, es decir, es una frontera de salida del fluido en la cual se fija la presión. A esta altura, la presión tiene un valor de 22632 Pa y la temperatura es de 216.65 K. Para los parámetros de turbulencia se escogen valores nulos.
- **Derecha e inferior:** Estas dos fronteras están definidas como una pared. La temperatura sigue la distribución de la atmósfera estándar.

5.2. PROBLEMA HÚMEDO

El siguiente caso a definir es el que tiene como fluido una mezcla de aire húmedo y agua líquida.

5.2.1. Geometría del problema

La geometría de este problema es idéntica a la del caso seco.

5.2.2. Ecuaciones constitutivas

Es aquí donde comienzan a observarse las diferencias entre los dos casos. Ya que las ecuaciones constitutivas del problema seco son también válidas para el caso húmedo con condensación, solo queda por definir cuál es la transferencia de masa debida a la condensación.

Transferencia de masa

Para el segundo problema a resolver, donde la condensación es el efecto a modelar, se define una transferencia de masa entre el vapor de agua de la fase primaria y la fase secundaria (agua líquida).

Cabe decir que la condensación en la atmósfera del vapor de agua es un proceso muy complejo y que no es entendido por completo. Idealmente, el vapor de agua empieza a condensar cuando el aire atmosférico alcanza condiciones de saturación. Sin embargo, esa condensación no es automática, sino que el vapor de agua necesita un soporte material donde nuclear, siendo típicamente partículas de aerosoles o de polvo presentes en la atmósfera. De hecho, si el aire está muy “limpio” (sin apenas concentración de partículas sólidas), se puede dar el caso que el aire saturado se encuentre subenfriado (por debajo de la temperatura de rocío) sin llegar a condensar. El momento de inicio de la condensación tampoco está claro. Pese a la presencia de aerosoles, se tienen que dar distintas condiciones cómo el choque con una de estas partículas de alguna molécula de agua para que comience la condensación.

Sobre la velocidad de condensación tampoco existe ninguna ley teórica ni experimental contrastada. En lo que sí coinciden los científicos, es que cuando el vapor de agua comienza a condensar, lo hace todo a la vez de forma prácticamente instantánea.

Ya que no es intención de este proyecto hacer un modelado exhaustivo de la condensación, consideraremos la atmósfera ideal en equilibrio termodinámico.

Por lo tanto, la condición que se debe cumplir para que se inicie el proceso de condensación, es que la humedad relativa supere un valor del 100%. Para el cálculo de la humedad relativa, necesitamos definir la presión de saturación. Usaremos la expresión empírica proporcionada por FLUENT.

Sea p_{sat} la presión de saturación:

$$\ln\left(\frac{p_{sat}}{p_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T} - 1\right) \times \sum_{i=1}^8 F_i [a(T - T_p)]^{i-1}$$

dónde

$$\begin{aligned} p_c &= 22.089 \text{ MPa} \\ T_c &= 647.286 \text{ K} \\ F_1 &= -7.4192420 \\ F_2 &= 2.972100 \cdot 10^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_3 &= -1.1552860 \cdot 10^{-1} \\
 F_4 &= 8.6856350 \cdot 10^{-3} \\
 F_5 &= 1.094098 \cdot 10^{-3} \\
 F_6 &= -4.39993 \cdot 10^{-3} \\
 F_7 &= 2.520658 \cdot 10^{-3} \\
 F_8 &= -5.218684 \cdot 10^{-4} \\
 a &= 0.01 \\
 T_p &= 338.15 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Queda por definir la presión de vapor:

$$p_{\text{vapor}} = \rho_{\text{aire humedo}} \cdot Y_{\text{vapor}} \cdot R_{\text{vapor}} \cdot T$$

dónde Y_{vapor} es la fracción másica del vapor de agua de la fase primaria y $R_{\text{vapor}}=461.5 \text{ J/kg K}$ la constante de gas ideal del vapor de agua.

Finalmente, la humedad relativa es el cociente entre la presión de vapor y la presión de saturación.

$$RH = \frac{p_{\text{vapor}}}{p_{\text{sat}}}$$

Ya tenemos la condición que se debe cumplir para que se inicie el proceso de condensación. La humedad relativa debe ser mayor que 1. Ahora queda definir la velocidad de condensación.

Pese a que el proceso es prácticamente instantáneo, nosotros haremos que se dilate un poco en el tiempo para poder observar sus efectos en los gráficos de FLUENT.

$$\dot{m}_{qp} = (RH - 1) \cdot 0.2 \cdot Y_{\text{vapor}} \cdot \rho_{\text{aire humedo}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{s}} \right]$$

La ecuación está multiplicada por un factor de 0.2 para, como ya se ha comentado anteriormente, dilatar un poco la condensación en el tiempo. q es la fase gaseosa y p es la fase líquida.

5.2.3. Condiciones iniciales

Para el problema con condensación, también debemos inicializar el contenido de vapor de agua presente en el aire húmedo. No existe ninguna ley que marque el contenido de vapor de agua en la atmósfera. De hecho, aunque no es un parámetro aleatorio, depende de una infinidad de factores que no podemos llegar a controlar. No tendrá la misma cantidad de vapor de agua la atmósfera que se extiende por encima de una ciudad a la que se esté situada sobre una zona desértica o sobre la costa.

Por ello, hacemos uso de los sondeos realizados por una estación meteorológica situada en la ciudad de Barcelona. Elegiremos un día en el que la temperatura en el suelo sea lo más cercana posible a los 15 °C de nuestra atmósfera estándar. Así mismo, para que se produzca el proceso de condensación, el día seleccionado será con un contenido relativamente alto de agua. Una vez seleccionados los datos, se traza una curva empírica que se ajuste lo más posible en función de la altura. Este proceso se detalla en el ANEXO B.

La función obtenida del contenido de vapor de agua en la atmósfera en función de la altura es la siguiente:

$$q_{total} = (2 \cdot 10^{-15} \cdot (z - 2500)^4 - 5 \cdot 10^{-11} \cdot (z - 2500)^3 + 6 \cdot 10^{-7} \cdot (z - 2500)^2 - 0.0039 \cdot (z - 2500) + 10.273) / 2400 \left[\frac{kg_{vapor}}{kg_{aire\ húmedo}} \right]$$

La fracción volumétrica inicial de agua en la atmósfera es nula. Es decir, la atmósfera en el instante inicial no contiene agua líquida.

5.2.1. Condiciones de contorno

A las condiciones de contorno del problema seco solo hay que añadirles las de fracción másica de vapor de agua y la fracción volumétrica de agua en la frontera superior. Ambas son definidas de la misma forma que en las condiciones iniciales.

6

Simulación del flujo

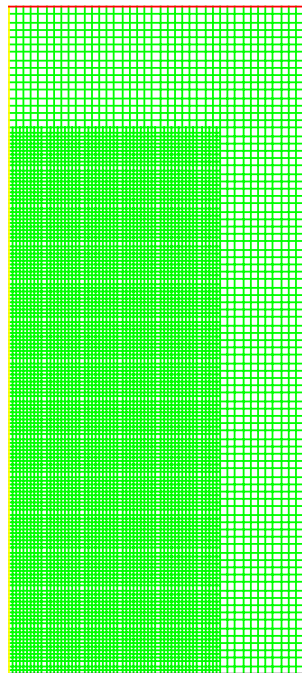
6. SIMULACIÓN DEL FLUJO

6.1. MALLA GAMBIT

Para la implementación del dominio de simulación, debemos utilizar el programa GAMBIT. Con GAMBIT generamos la geometría que tendrá el problema, así como el mallado inicial y las condiciones de contorno (que posteriormente podrán ser modificados en FLUENT).

La malla rectangular consta de 9568 celdas cuadradas. La discretización espacial está separada en dos partes diferenciadas. En la zona de acción de la térmica, la longitud de cada lado de una celda es de 62.5 metros. Fuera de dicha zona, la longitud de cada cara es de 125 metros.

La acción inicial de la térmica recae sobre 8 celdas (radialmente). Pese a la baja resolución, se conseguirán obtener comportamientos físicos coherentes, a la vez que la convergencia de la solución. Se recuerda que la principal misión del presente proyecto es la de reproducir resultados cualitativos, no cuantitativos.



Grid (Time=2.8000e-01)

Nbv 25, 2009
FLUENT 6.3 (2d, pbrns, mgke, unsteady)

Figura 11.- Malla computacional

6.2. IMPLEMENTACIÓN EN FLUENT

Llegados a este punto, y teniendo ya claro todo lo que queremos hacer, solo queda implementarlo en FLUENT. Para ello, deberemos establecer y activar las características correspondientes a nuestro flujo. En el ANEXO C, se encuentra detallado un resumen de la configuración de FLUENT para ambos casos. Se comentarán en este apartado las más importantes.

Una de las dificultades más importantes que se tuvieron fue la de la configuración de las condiciones operativas, ya que FLUENT trata de una manera peculiar los términos de las fuerzas másicas en la ecuación de conservación del momento. El término aparece como $(\rho - \rho_0)g$, siendo ρ_0 la densidad operativa. Esta forma del término de las fuerzas másicas viene de la redefinición en FLUENT de la presión como $p' = p - \rho_0 gx$, de forma que un fluido en reposo tenga una presión hidrostática de $p' = 0$. Si no se especifica lo contrario, FLUENT computa la densidad operativa haciendo una media de todas las celdas. Se ha especificado una densidad operativa $\rho_0 = 0$ para que el perfil de presiones inicializado fuera coherente con el campo fluido. Así mismo, la presión operativa también fue definida como nula.

En lo que se refiere a las fronteras, la izquierda ha sido definida como eje de simetría, la inferior y la derecha han sido configuradas como paredes con un gradiente de temperaturas idéntico al de la atmósfera, y la frontera superior es *PRESSURE OUTLET*, es decir, una frontera por la que sale el fluido (en principio) y se fijan la presión y temperatura correspondientes a una altura atmosférica de 11000 metros.

En el caso con humedad, se ha implementado un modelo bifásico que permite la presencia de una fase gaseosa y de otra líquida. Además, la fase gaseosa está compuesta de dos especies diferentes: aire y vapor de agua.

Para inicializar las variables fluidas que no fueran contantes, así como para establecer perfiles en las fronteras o definir la ley que gobierna el proceso de transferencia de masa entre el vapor de agua y el agua líquida (condensación) se han implementado pequeñas funciones en el lenguaje de programación C que FLUENT reconoce y calcula. Estas son las llamadas

user defined function (UDF) o funciones definidas por el usuario. En el anexo, se adjuntas las funciones utilizadas.

La configuración de los controles para la resolución de las ecuaciones (*Panel “Solution Controls”*) es la que viene por defecto, excepto en el caso del acoplamiento de la presión y la velocidad (*“Pressure-Velocity coupling”*) que FLUENT recomienda el algoritmo *PISO* para flujos no estacionarios y en de la discretización de la presión que FLUENT sugiere que se use el esquema *PRESTO!* cuando se modelan flujos movidos por la convección natural.

En cuanto a la elección del paso temporal, FLUENT da unas recomendaciones para el cálculo del tiempo característico del flujo, sugiriendo que se tome un paso temporal del orden de un cuarto el tiempo característico:

$$\tau = \frac{L}{\sqrt{\beta g L \Delta T}} = \frac{250m}{\sqrt{0.033K^{-1} \cdot 9.81m/s^2 \cdot 250m \cdot 5K}} \approx 12s$$

Como coger un paso temporal de 3 segundos nos parece algo demasiado grande en principio, tras hacer varios ensayos previos, se decide tomar un valor para el paso temporal de 0.2 segundos. En el cálculo del paso temporal, se permite a FLUENT que realice 10 iteraciones antes de pasar al siguiente instante para simular.

7

Resultados

7. RESULTADOS

A continuación, se van a presentar, interpretar y analizar los resultados de las simulaciones realizadas con FLUENT. Se han realizado tres simulaciones distintas: una para el problema seco, otra para el problema húmedo, y una más para realizar el análisis de sensibilidad sobre el caso seco.

7.1. PROBLEMA SECO

7.1.1. Presentación de resultados y análisis

Una vez inicializado y estabilizado el campo fluido, y amortiguados los errores que comete FLUENT en la primeras iteraciones, se tienen las siguientes distribuciones iniciales para un tiempo de 0.11 segundos.

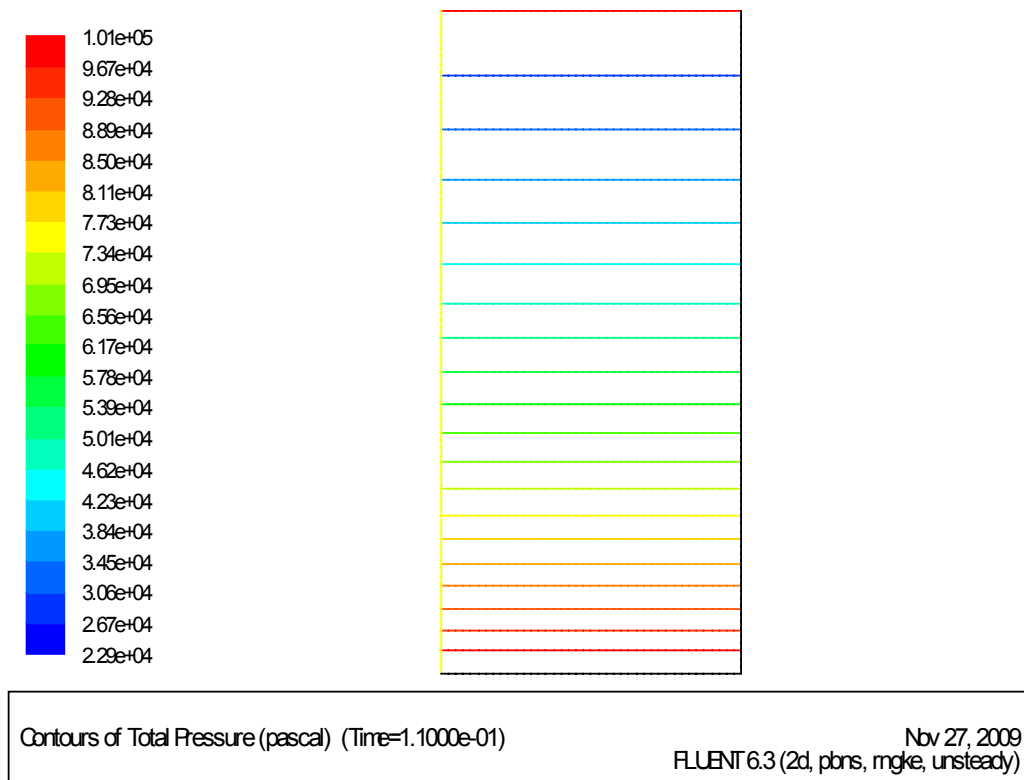


Figura 12.- Contorno inicial de presiones. Caso seco

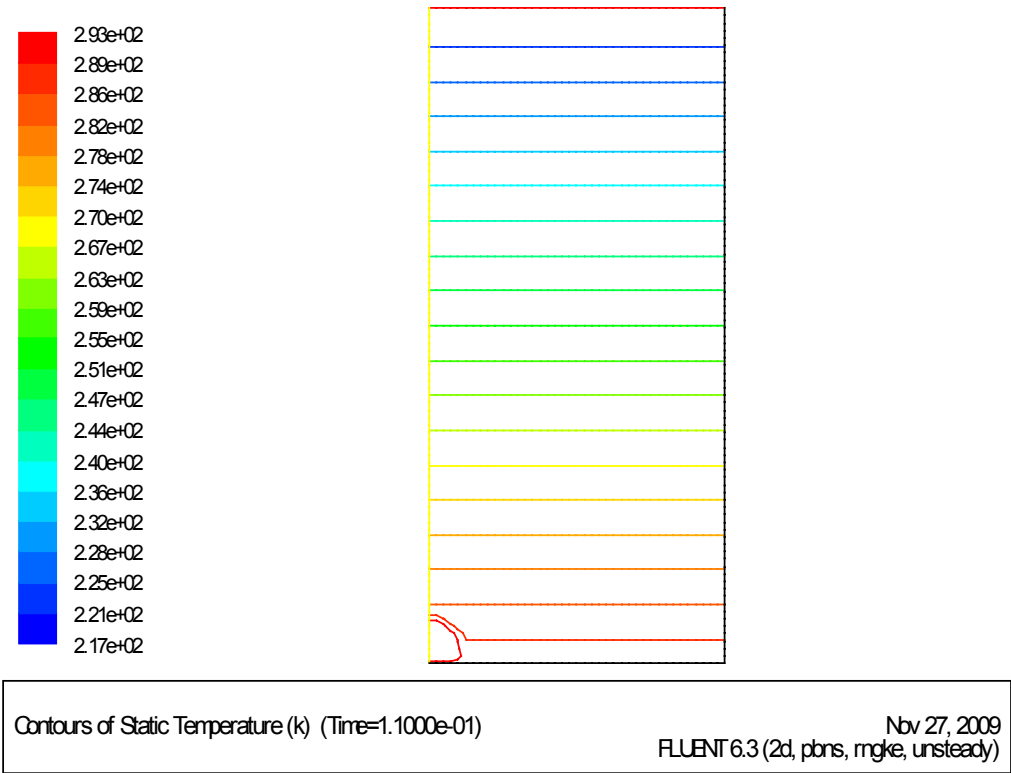


Figura 13.- Contorno inicial de temperaturas. Caso seco

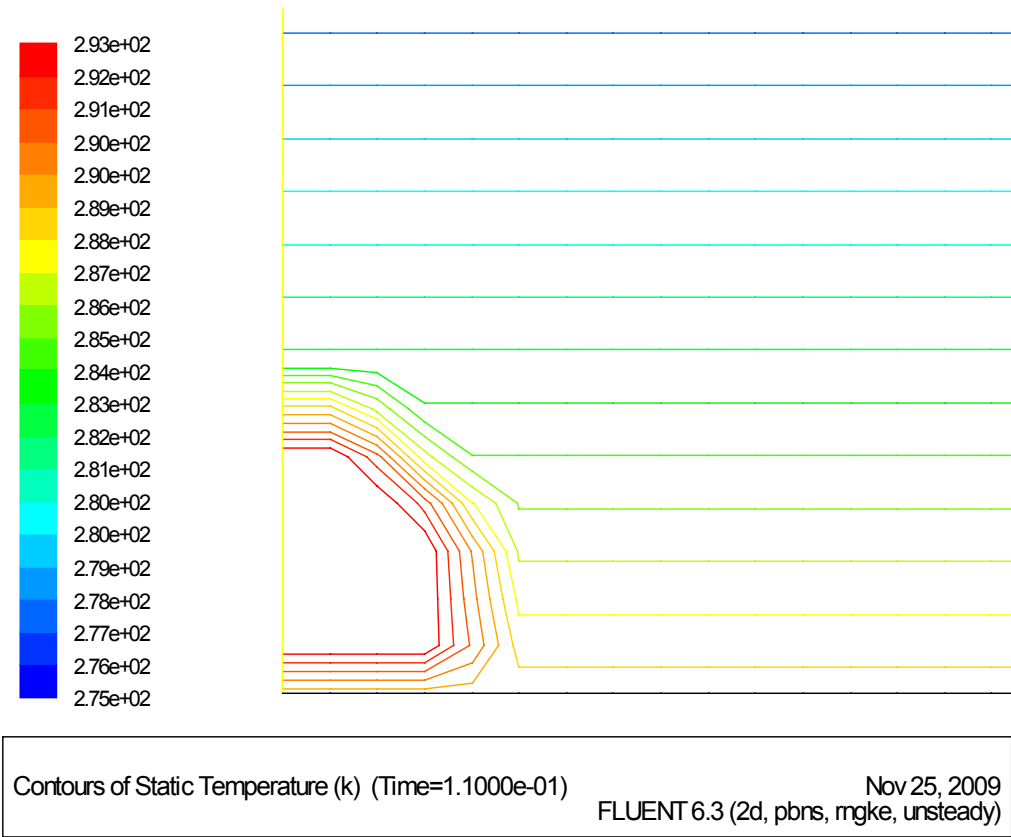


Figura 14.- Detalle del contorno inicial de temperaturas. Caso seco

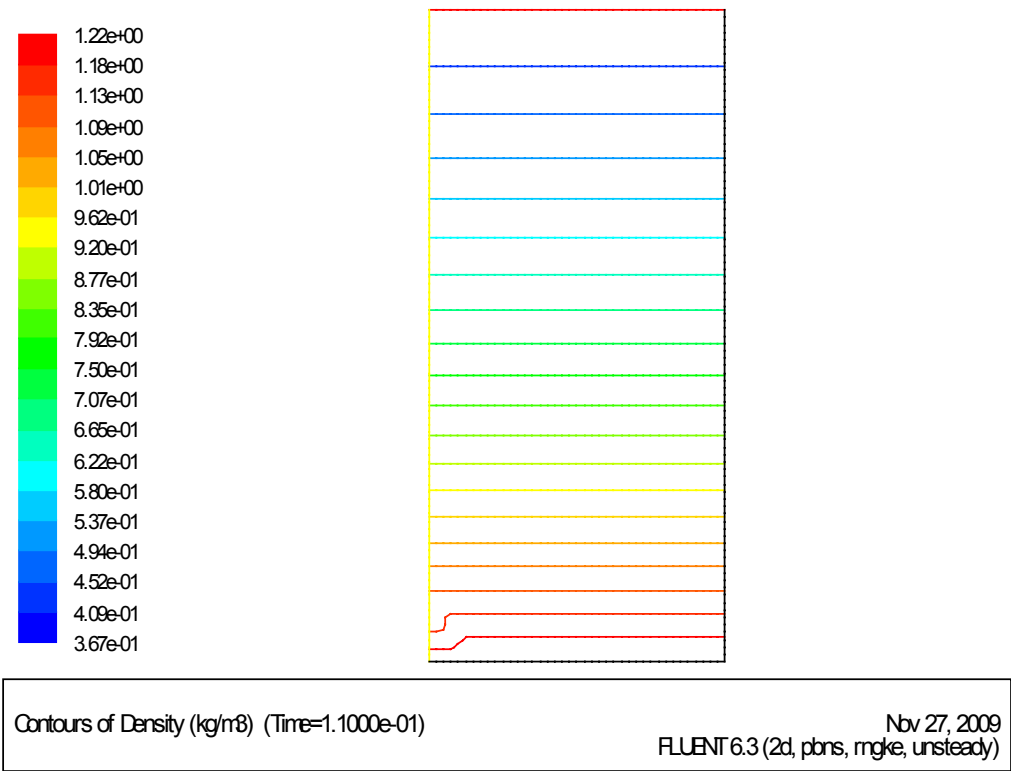


Figura 15.- Contorno inicial de densidad. Caso seco

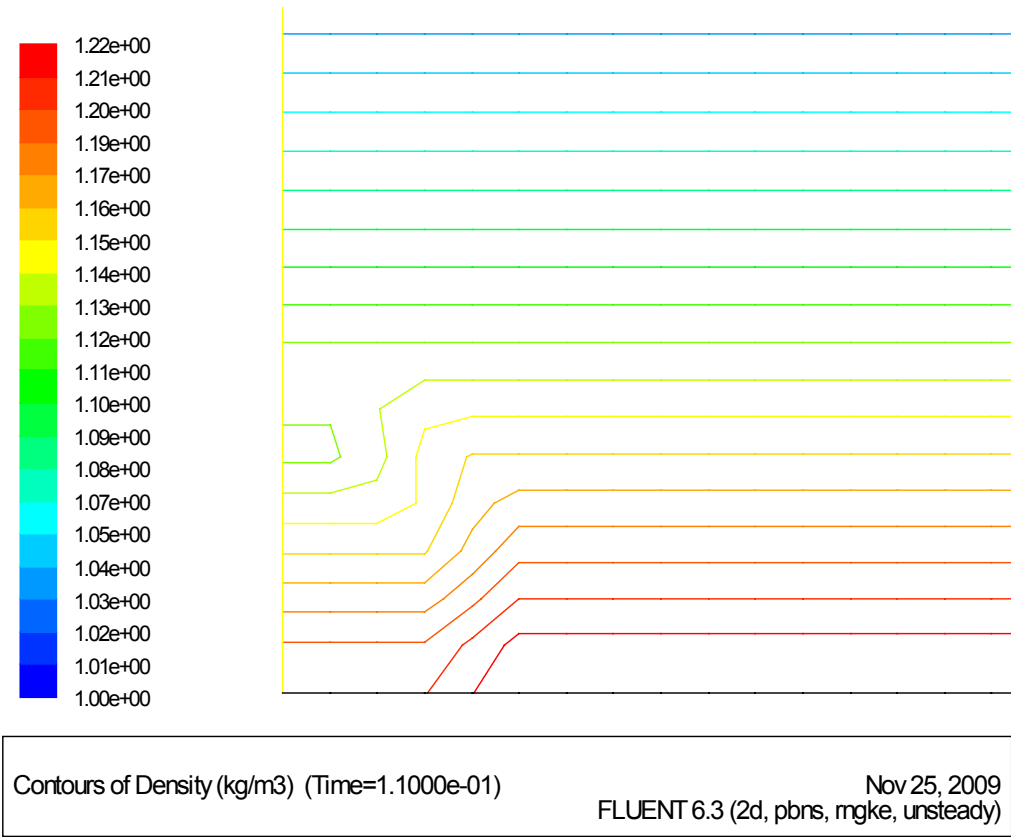


Figura 16.- Detalle del contorno inicial de densidad. Caso seco

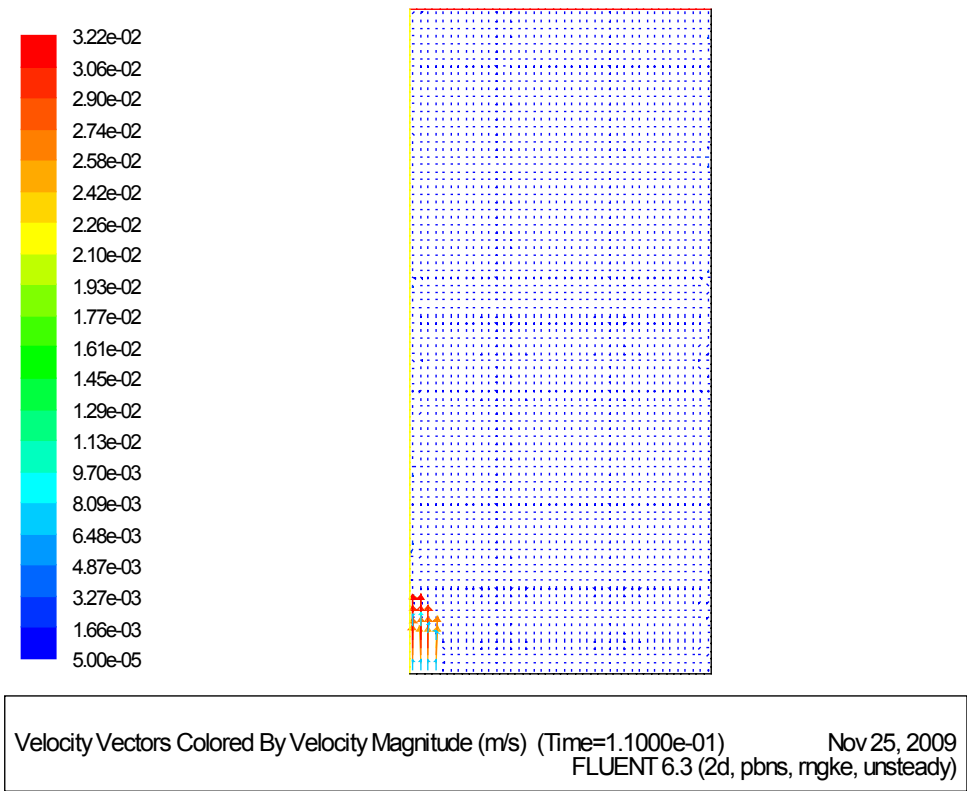


Figura 17.- Vectores iniciales de velocidad. Caso seco

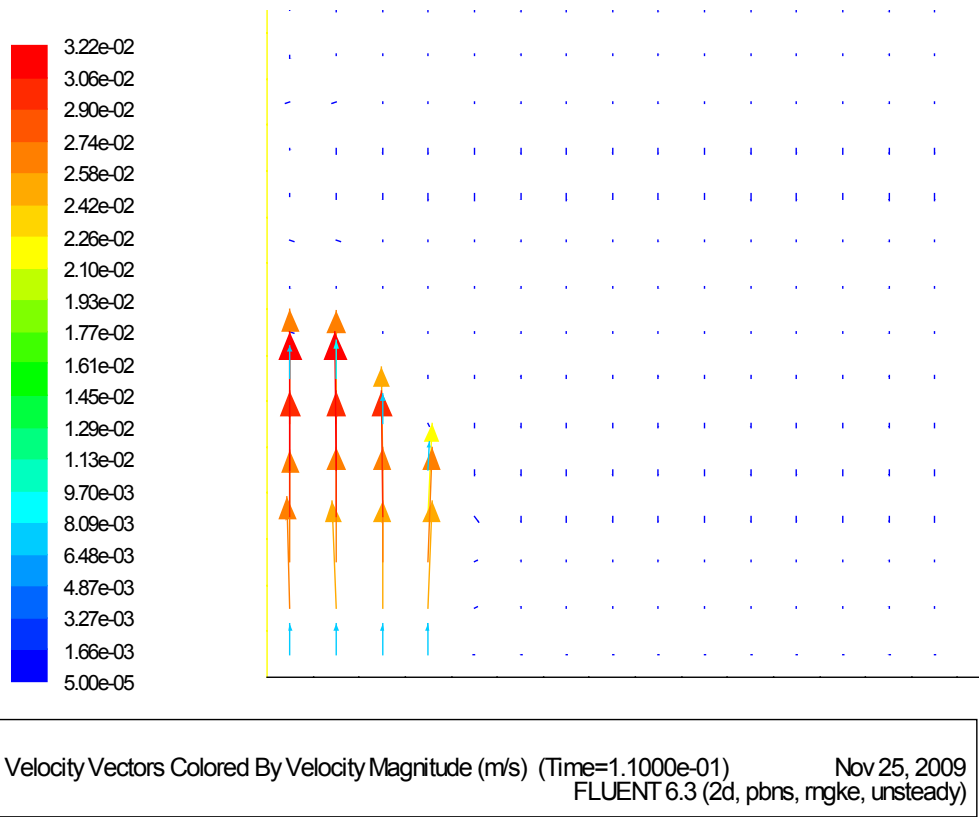


Figura 18.- Detalle de los vectores iniciales de velocidad. Caso seco

En el instante inicial se aprecia perfectamente la posición de la térmica en la atmósfera. Está situada en la esquina inferior izquierda del dominio, a una temperatura de 293.15 K y con un radio de 500 metros. También se aprecia que según nos alejamos radialmente del centro de la térmica, la temperatura de ésta va disminuyendo debido a que el entorno se encuentra más frío.

El hecho de que la temperatura de la térmica sea mayor, provoca que tenga una menor densidad. En el contorno de densidad de la atmósfera y especialmente en el detalle de la térmica se aprecia un gradiente de dicha propiedad importante de la térmica respecto a sus alrededores. Estos gradientes de densidades, presentes durante toda la simulación, son los que van a generar las fuerzas de flotabilidad y en definitiva, el movimiento.

Así mismo, los contornos de presión total son los de la atmósfera estándar. Cabe decir, que la distribución de presiones será la misma durante toda la simulación, como era de esperar, pues prácticamente solo tiene influencia la presión hidrostática debida a la columna de aire, mientras que la presión dinámica debida al movimiento del fluido tiene una contribución casi nula debido a la baja densidad del aire.

También se han representado en el instante inicial los vectores de la velocidad. Pese a no haber transcurrido apenas 0.1 segundos desde que la atmósfera se encontrara totalmente en reposo, ya se puede contemplar cómo las fuerzas de flotabilidad empiezan generar un movimiento ascendente en la térmica.

Pasemos a ver ahora los resultados de la simulación para distintos instantes. En el primero de los gráficos, cada punto representa el valor de la vorticidad en cada celda en función de la altura, por lo que de esta forma se puede averiguar la altura alcanzada por el centro de la térmica (punto de máxima vorticidad).

Tiempo=1.28 segundos

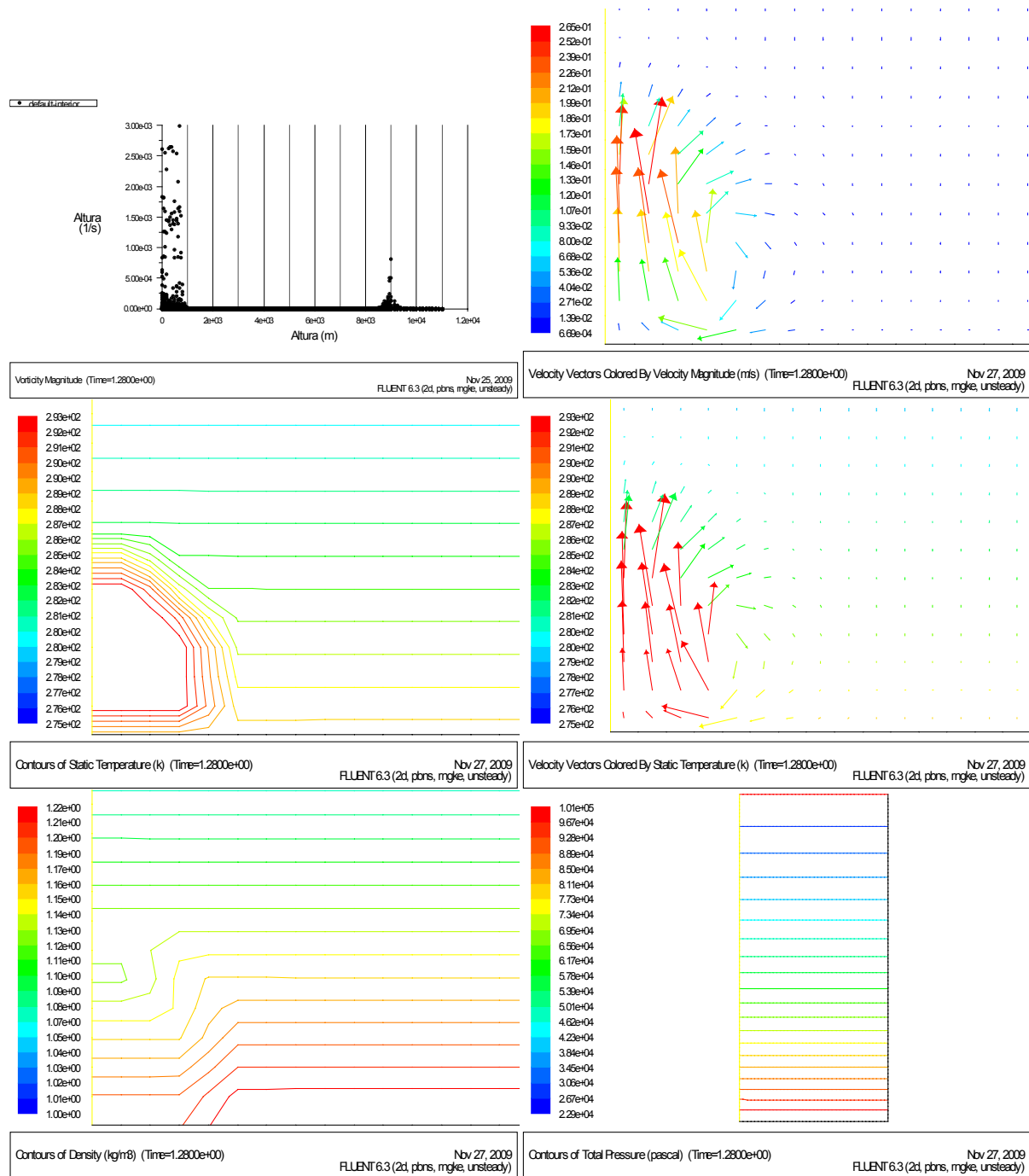


Figura 19.- Variables fluidas para $t=1.28$ s. Caso seco

Tiempo=9.28 segundos

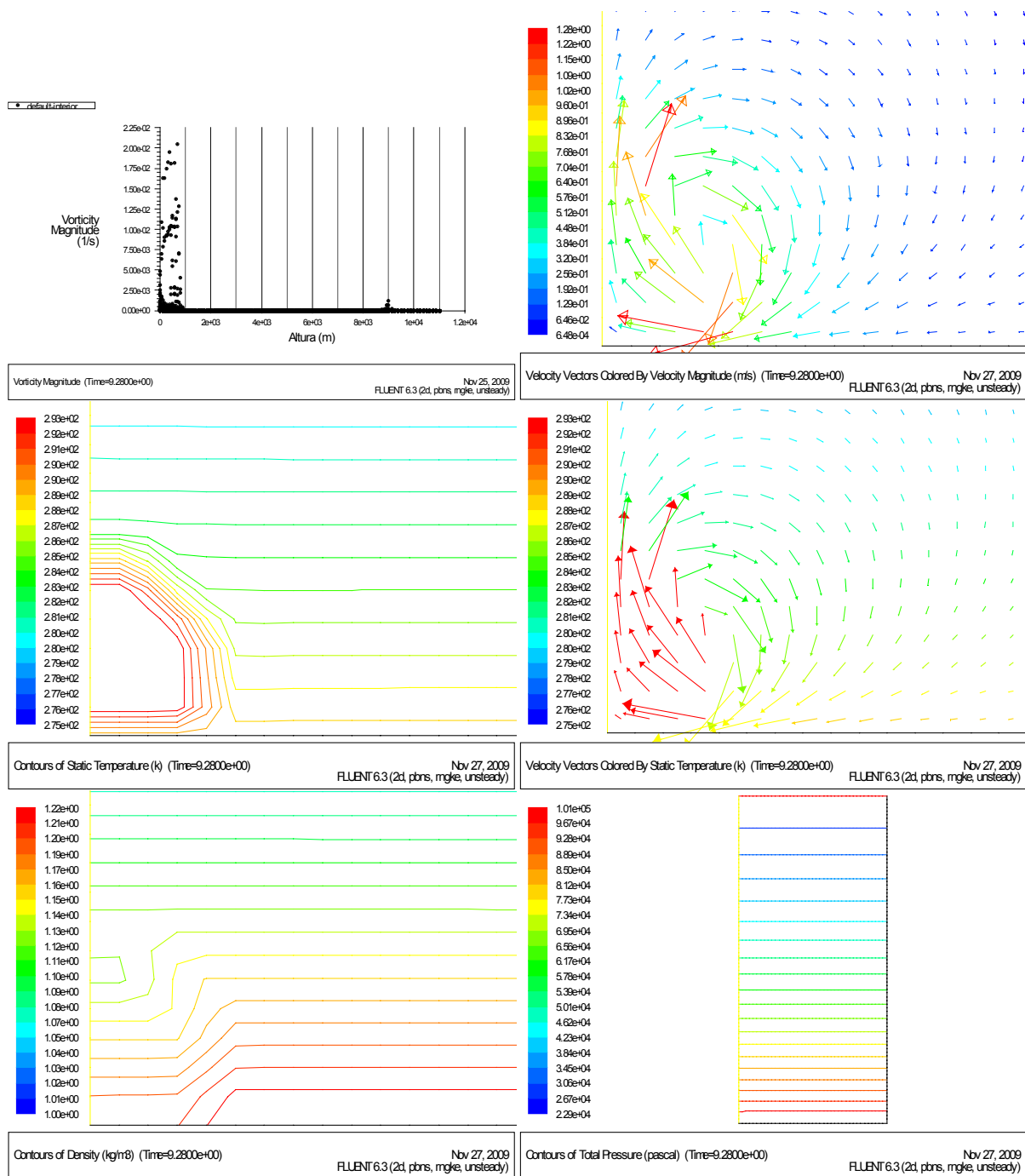


Figura 20.- Variables fluidas para $t=9.28$ s. Caso seco

Tiempo=39.28 segundos

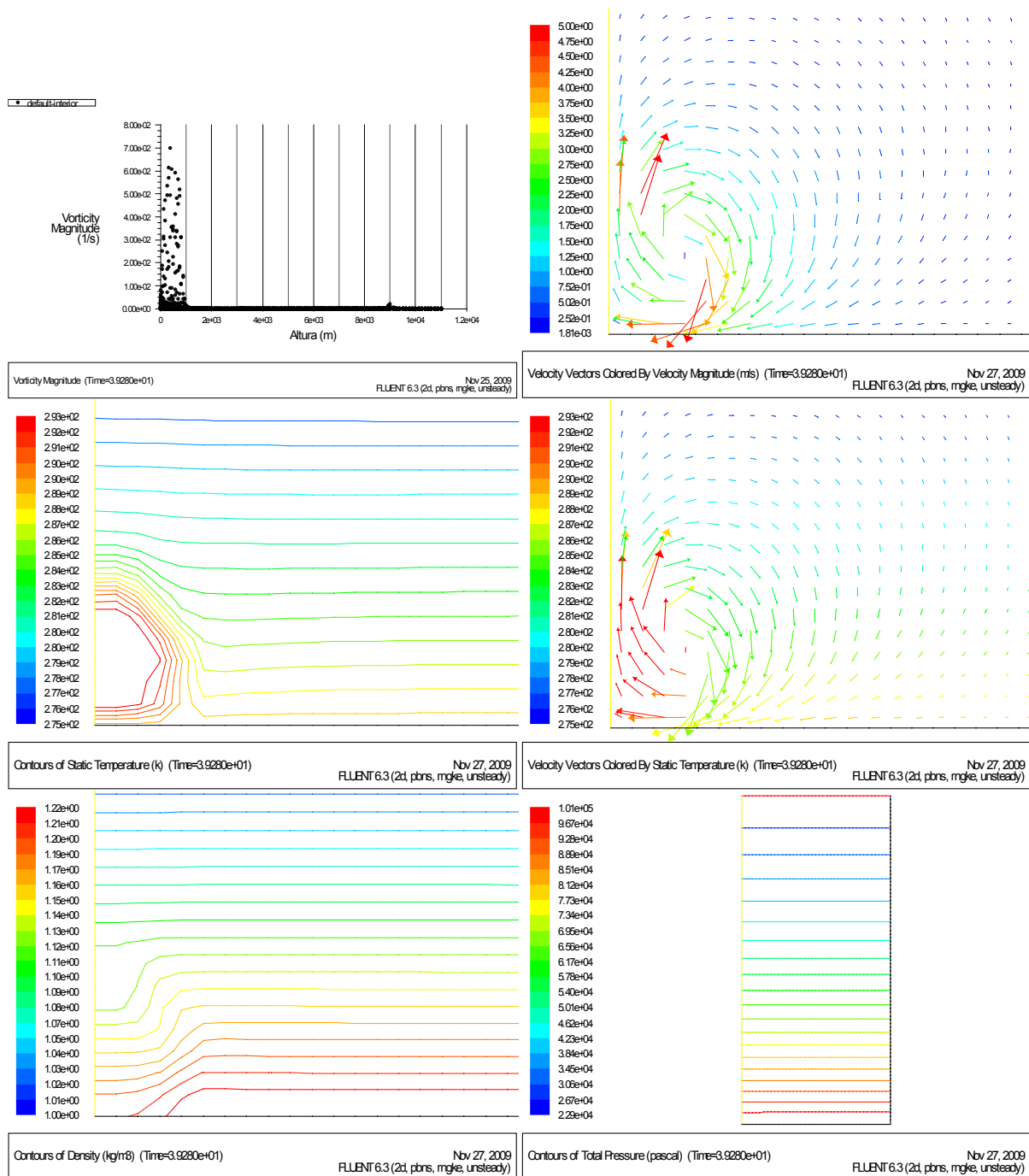


Figura 21.- Variables fluidas para $t=39.28$ s. Caso seco

Tiempo=69.28 segundos

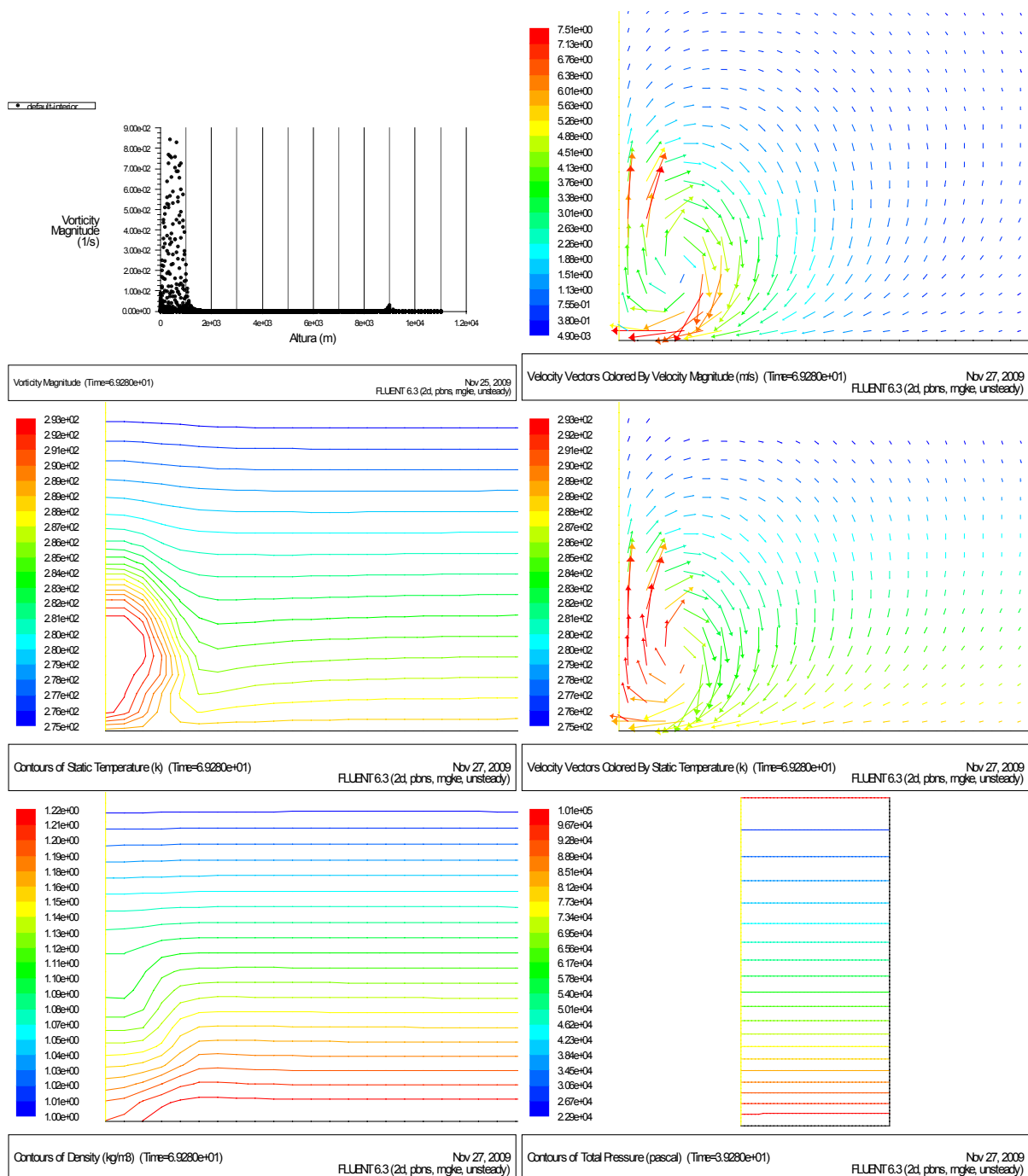


Figura 22.- Variables fluidas para $t=69.28$ s. Caso seco

Tiempo=99.28 segundos

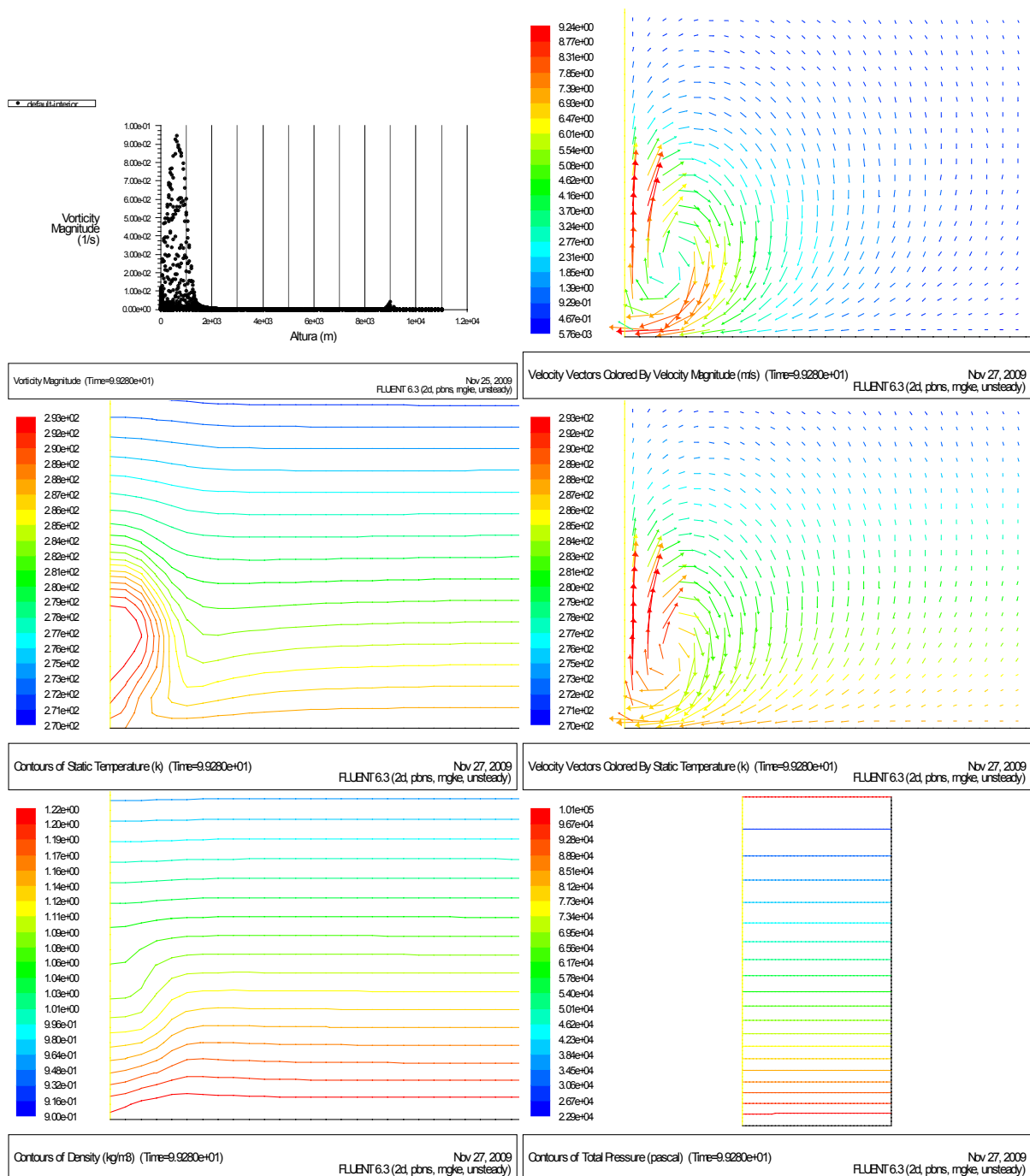


Figura 23.- Variables fluidas para $t=99.28$ s. Caso seco

Tiempo=119.28 segundos

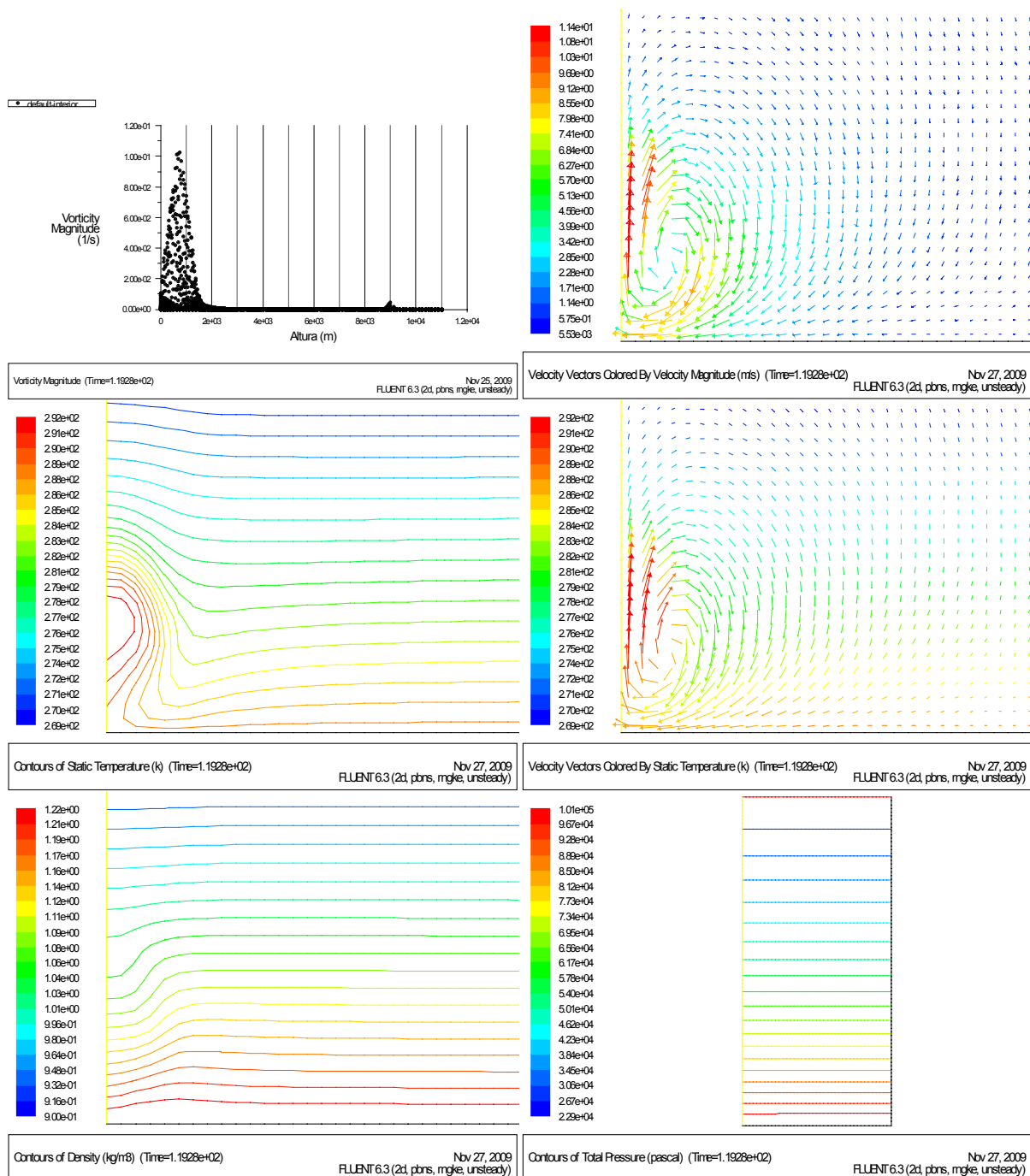


Figura 24.- Variables fluidas para $t=119.28$ s. Caso seco

Tiempo=159.28 segundos

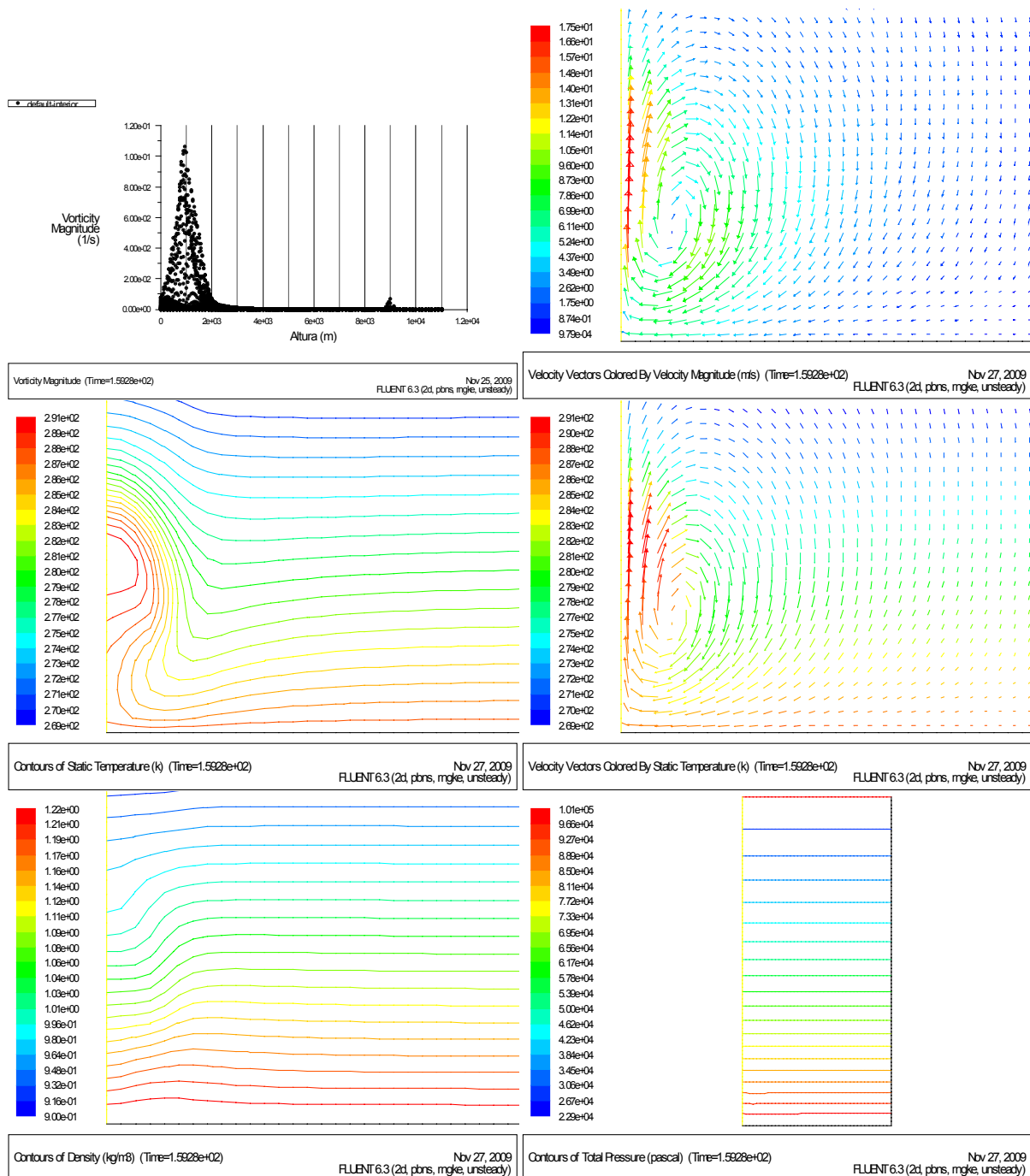
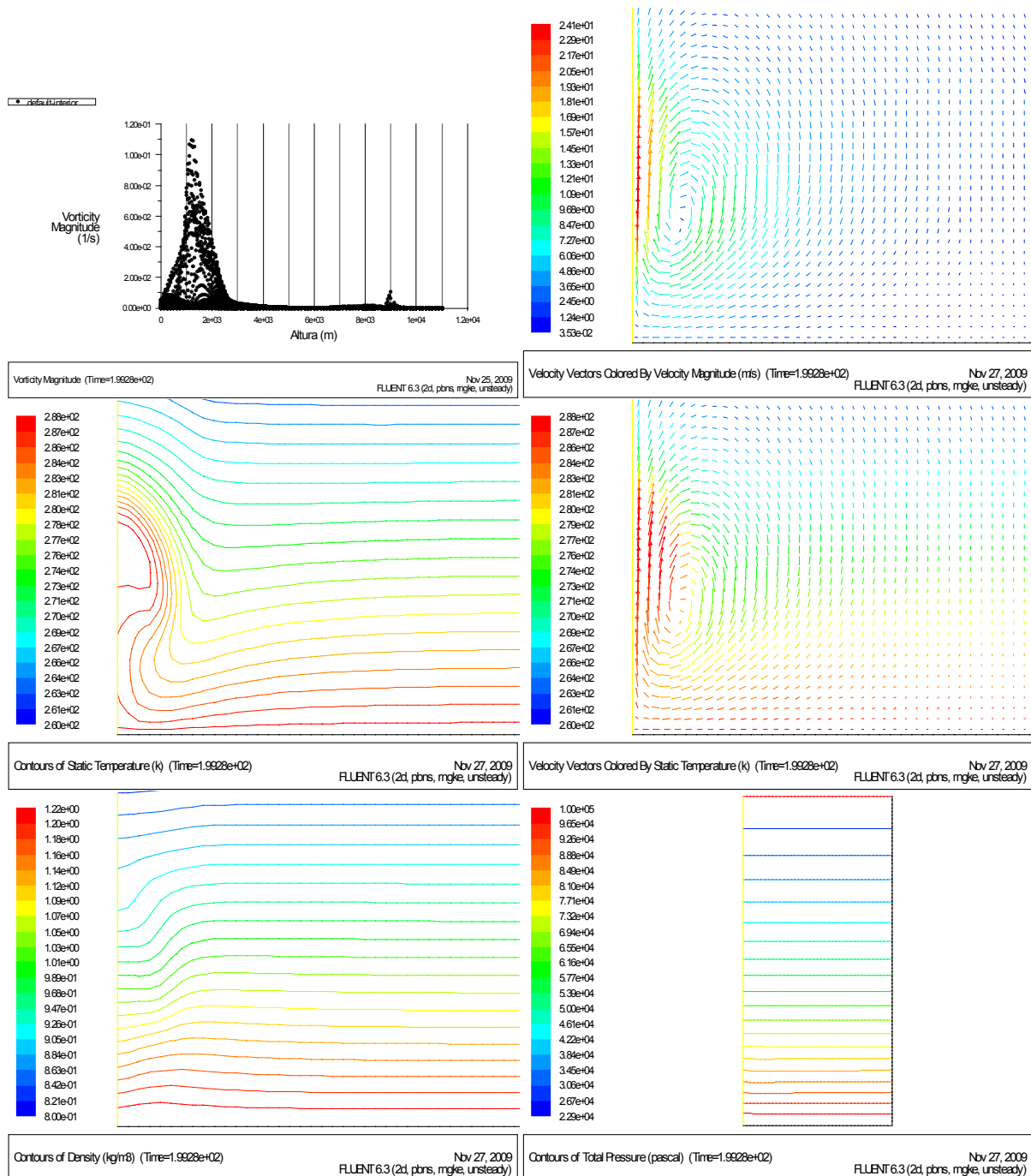


Figura 25.- Variables fluidas para $t=149.28$ s. Caso seco

Tiempo=199.28 segundos

Figura 26.- Variables fluidas para $t=159.28$ s. Caso seco

Tiempo=249.28 segundos

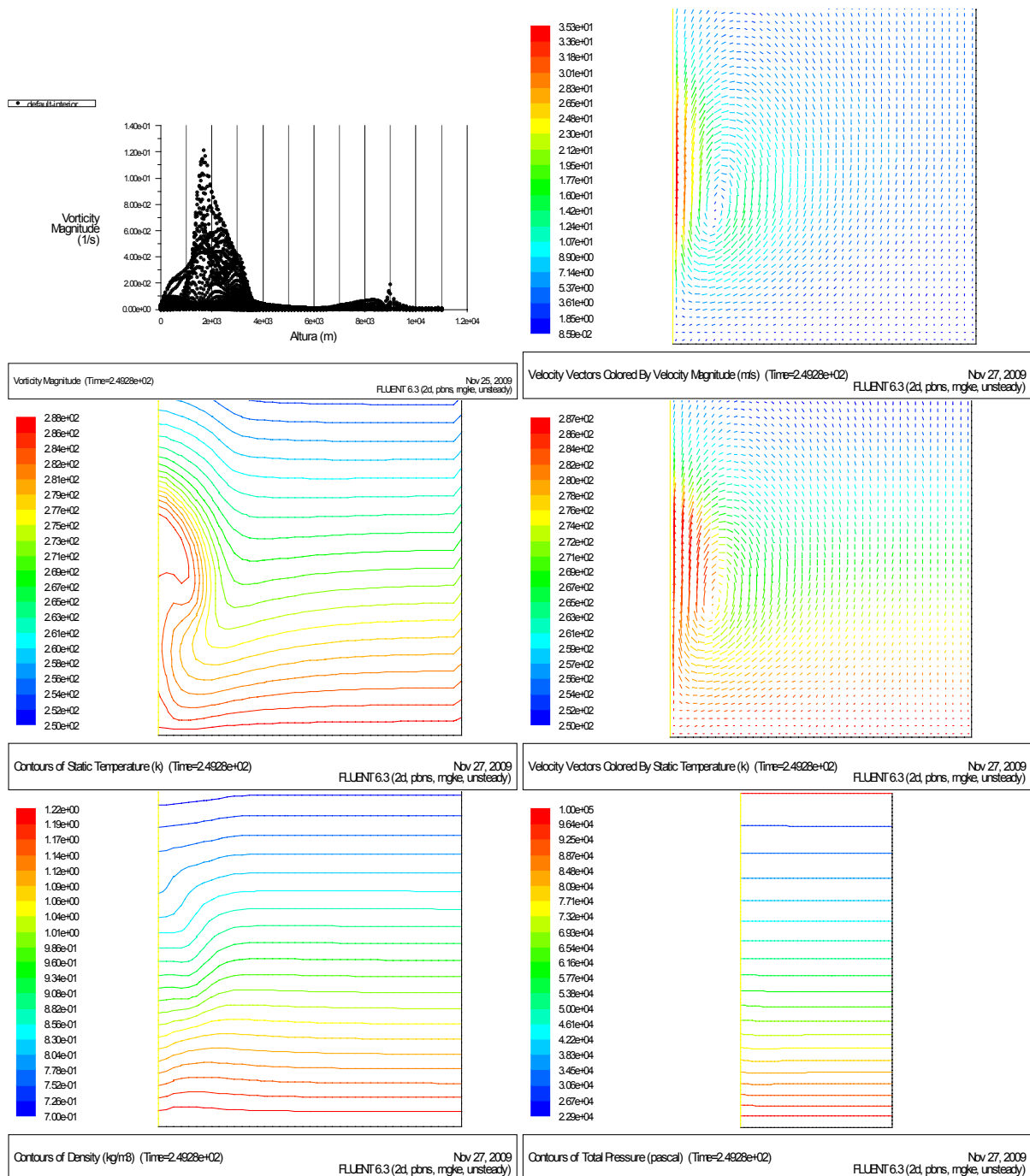


Figura 27.- Variables fluidas para $t=249.28$ s. Caso seco

Tiempo= 299.28 segundos

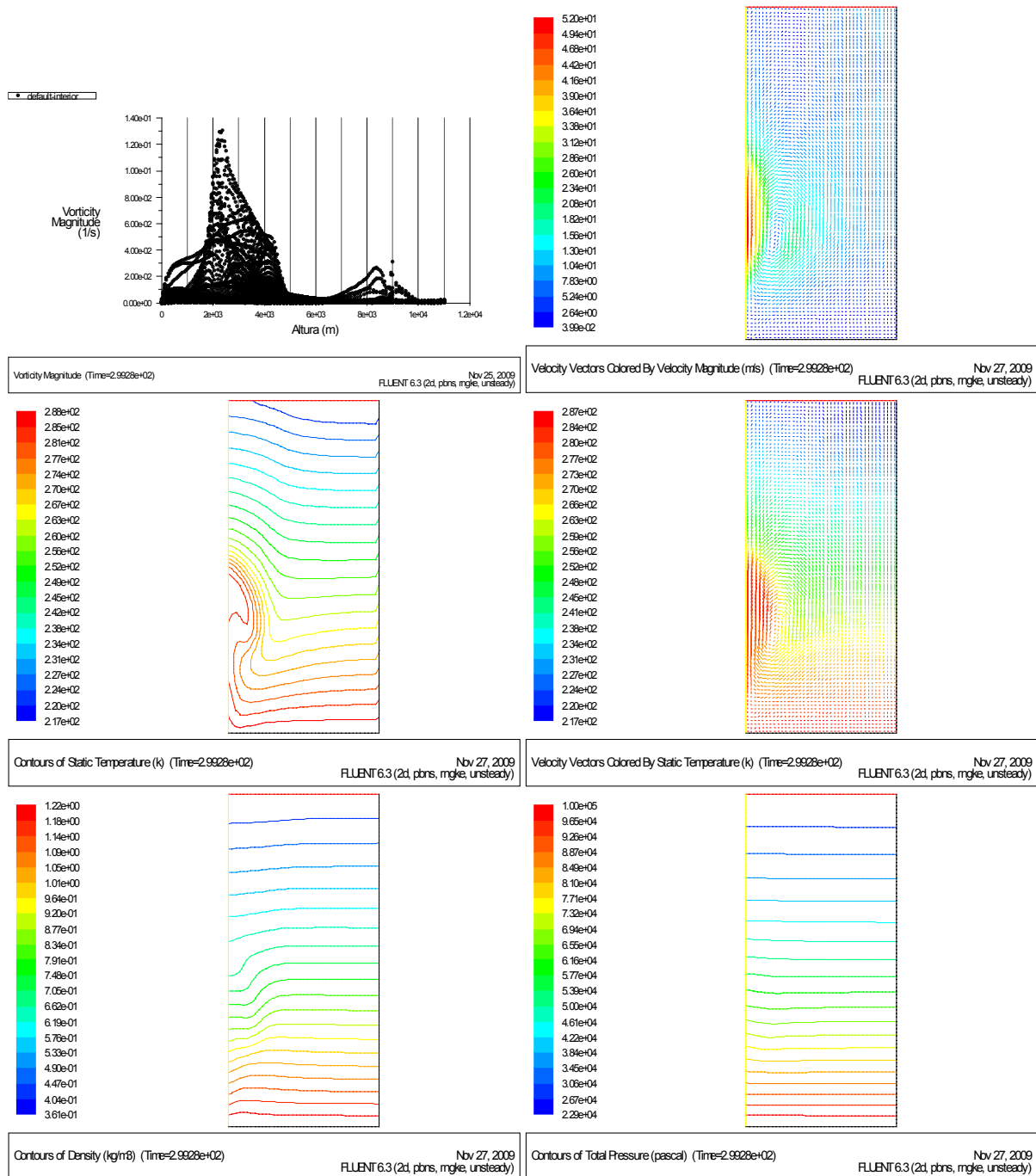


Figura 28.- Variables fluidas para $t=299.28$ s. Caso seco

Tiempo=349.28 segundos

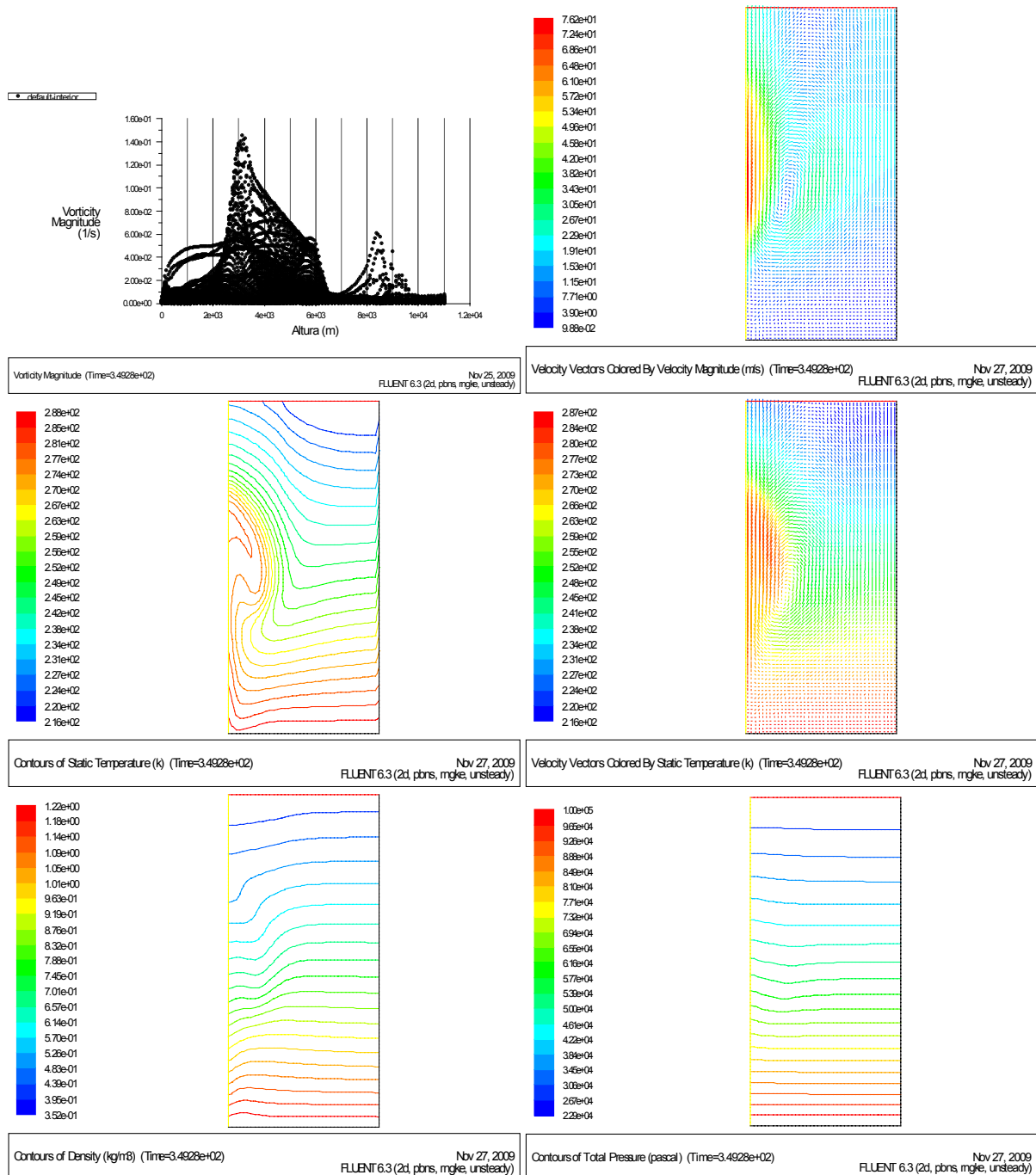


Figura 29.- Variables fluidas para $t=349.28$ s. Caso seco

Tiempo=399.28 segundos

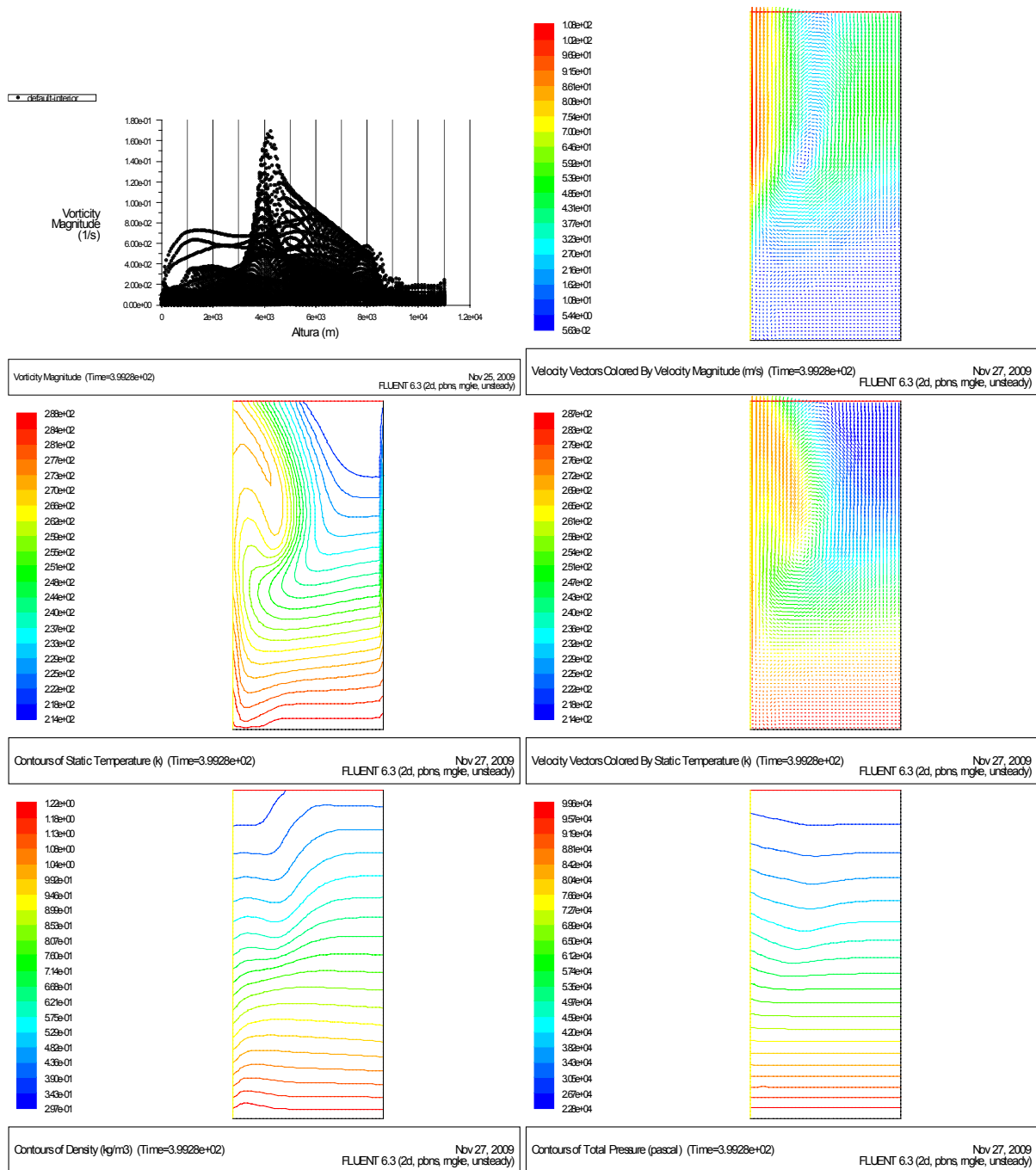


Figura 30.- Variables fluidas para $t=399.28$ s. Caso seco

Se ha presentado la evolución de la térmica y sus propiedades más significativas en el tiempo.

Siguiendo la evolución de los contornos de densidad con el tiempo, es fácil reconocer el lugar donde se encuentra la térmica, pues es la zona con una densidad menor que otro punto situado a la misma altura pero alejado del eje de simetría. Ésta diferencia de densidad es la que permite el continuo ascenso de la térmica.

Así mismo, la presión total de la atmósfera permanece estratificada en su mayor parte, sufriendo variaciones muy pequeñas en la zona del movimiento de la térmica, debido a la presión dinámica.

Como ya se ha comentado, desde el primer instante comienzan a afectar las fuerzas de flotabilidad al movimiento de la térmica, poniéndose de manifiesto en las representaciones de los vectores de velocidad.

A los 1.28 segundos, apenas se pueden apreciar variaciones en la temperatura de la térmica. Lo que sí es notablemente distinto es la velocidad respecto al momento anterior representado. La velocidad máxima ha pasado de ser de 0.0322 m/s a 0.0265 m/s en tan solo 1.17 segundos. Esto da cuenta de la enorme influencia de las fuerzas de flotabilidad. Así mismo, ya se empieza a apreciar la curvatura de los vectores de velocidad que comienzan a girar en torno al centro de la térmica formando el característico torbellino o “swirl” presente en los flujos turbulentos. También se ha querido plasmar la vorticidad en función de la altura en un gráfico, no porque esta magnitud sea especialmente de nuestro interés, sino para poder determinar con algo más de precisión la altura alcanzada por la térmica, ya que el punto de máxima vorticidad será su centro.

En el siguiente momento representado, aún no se nota ningún cambio en la temperatura de la térmica. A los 9.28 segundos, la velocidad pico en uno de los puntos de la térmica es de 1.28m/s. Pese a que aún no ha comenzado a ascender, parece que gira con más virulencia en torno al punto de máxima vorticidad. La térmica está cogiendo “fuerza” antes de desprenderse del suelo y empezar a ascender.

Transcurridos 39.28 segundos desde que se inicializara el campo fluido en reposo, ya se comienza a apreciar ligeramente que la térmica se está volviendo más “esbelta”, dando la impresión de comenzar a ascender. La velocidad pico es de 5 m/s. El valor de la vorticidad ha subido, pero su pico continúa estando aproximadamente a la misma altura.

El desarrollo del flujo continúa con esta dinámica durante toda la simulación. La térmica asciende a la para que la velocidad punta marca cada vez valores más altos. Cabe decir que también se hace patente el enfriamiento de la térmica al ascender, debido principalmente a que el exterior está más frío.

A continuación se muestra una tabla detallada con la velocidad máxima fluida, la altura y la velocidad de ascensión de la térmica en función del tiempo transcurrido.

Tiempo [s]	Velocidad máxima [m/s]	Altura de la térmica [m]	Velocidad de ascenso [m/s]
0,11	0,0322	250	-
1,28	0,265	250	0,00
9,28	1,28	300	6,25
39,28	5	375	2,50
69,28	7,51	625	8,33
99,28	9,24	675	1,67
119,28	11,4	775	5,00
159,28	17,5	950	4,38
199,28	24,1	1250	7,50
249,28	35,3	1650	8,00
299,28	52	2375	14,50
349,28	76,2	3150	15,50
399,28	108	4200	21,00
449,28	-	5400	24,00

7.1.2. Conclusiones parciales

Como cabía esperar, se hace patente el ascenso de la térmica producido únicamente por las fuerzas de flotabilidad debidas a una diferencia de

temperatura inicial de solo 5°C. El fluido rota en torno al centro de vorticidad a la vez que se eleva.

Cabe señalar que una vez transcurrido un tiempo en el que la térmica ha ido acelerando su velocidad de ascenso, a partir del instante de $t=69.28$ segundos se hace apreciable que este ascenso se frena, para posteriormente volver a acelerarse. Esto es debido al enfriamiento que empieza a sufrir la térmica, lo cual hace disminuir las fuerzas de flotabilidad. En este punto, el flujo continúa girando, adquiriendo mayor energía cinética y “cogiendo fuerza”, lo cual le permite acelerarse y continuar incrementando su velocidad de ascenso. Es un efecto similar al ocurrido en los instantes iniciales, cuando la térmica tardó en despegar del suelo.

El cuanto al mecanismo de ascenso de la térmica, veamos en más detalle su funcionamiento. Debido a que inicialmente ésta se encuentra más caliente que sus alrededores, su densidad es más baja. Al ascender, debido principalmente al contacto con una región más fría y al mezclado producido por la rotación del flujo con el aire exterior frío, la térmica se enfría gradualmente. Al enfriarse, debería disminuir e incluso detener su ascenso. Lo que ocurre, es que aunque se haya enfriado respecto a su temperatura inicial, ha ascendido, lo que conlleva, debido a la estratificación de la temperatura de la atmósfera estándar, que la térmica continúa estando más caliente que su entorno, y por lo tanto, existe una diferencia de densidades suficientemente grande para generar una fuerza de flotabilidad que sea capaz de mover el fluido.

7.2. CASO HÚMEDO

7.2.1. Presentación de resultados y análisis

Se presenta a continuación los resultados obtenidos de simular la misma térmica que en el caso seco, pero esta vez con un fluido mezcla de aire y vapor de agua, que llegado a condiciones de saturación, condensa en agua líquida.

Igual que anteriormente, incluyen gráficos del momento inicial a los 0.11 segundos.

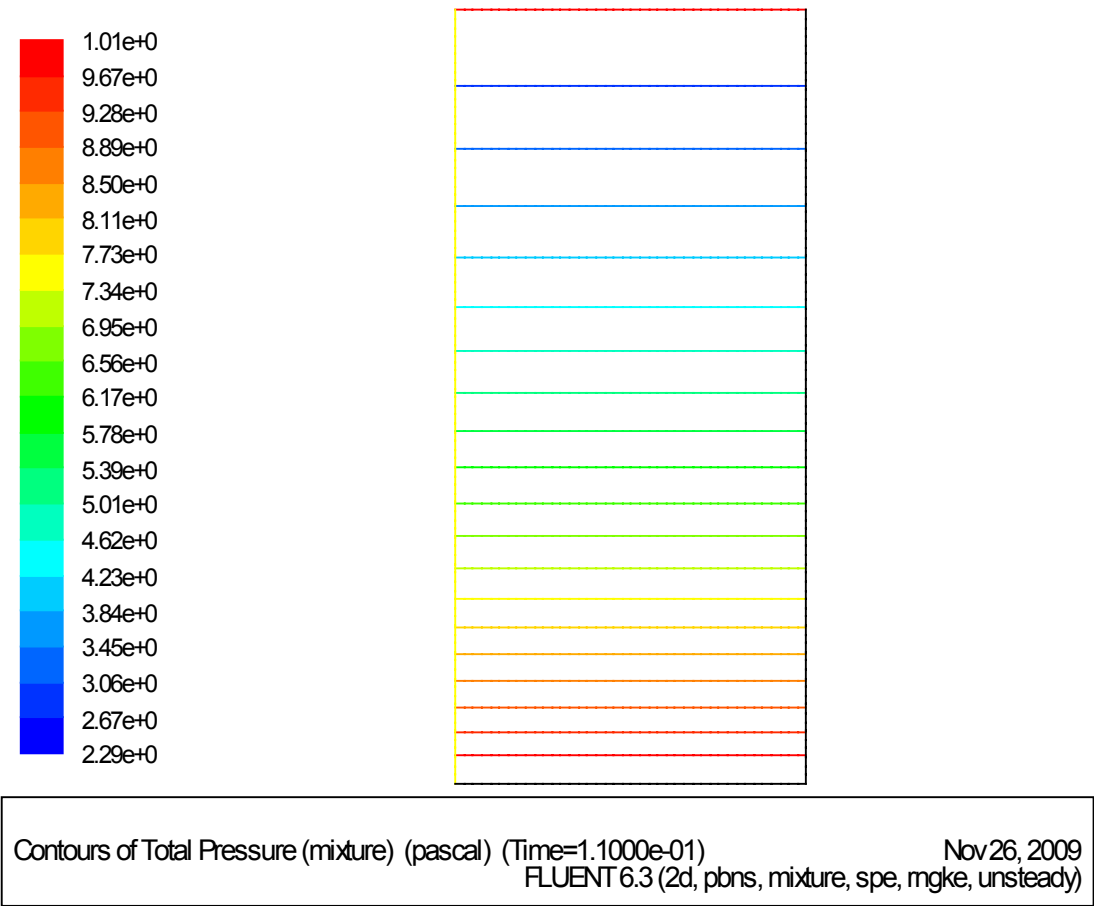


Figura 31.- Contornos iniciales de presión. Caso húmedo

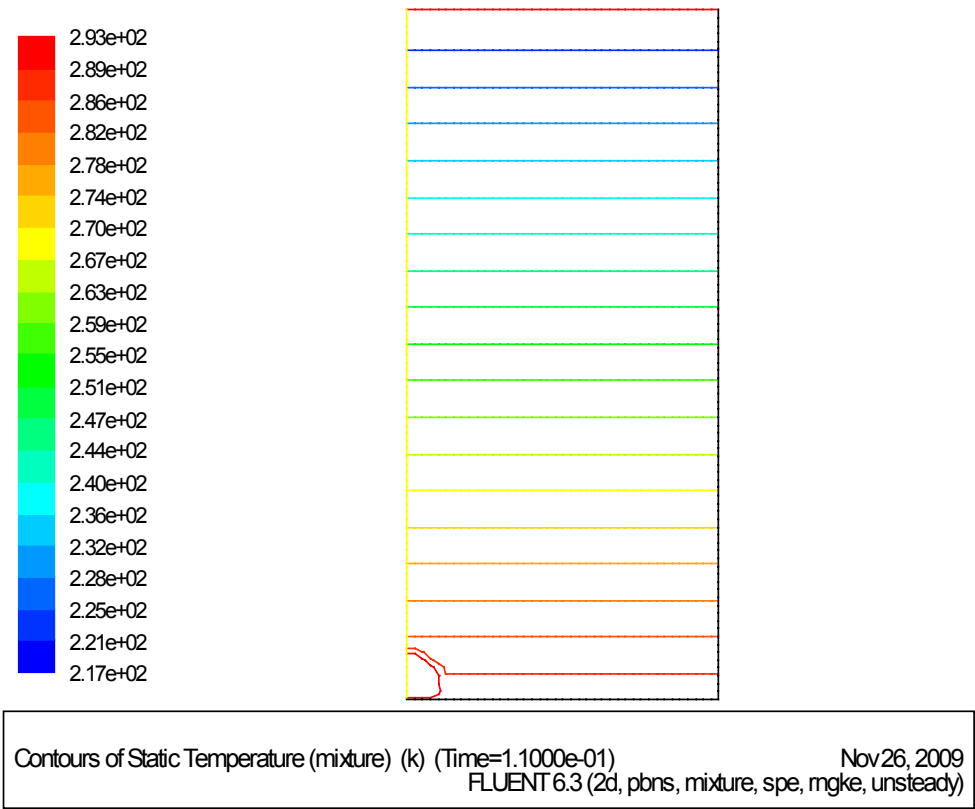


Figura 32.- Contornos iniciales de temperatura. Caso húmedo

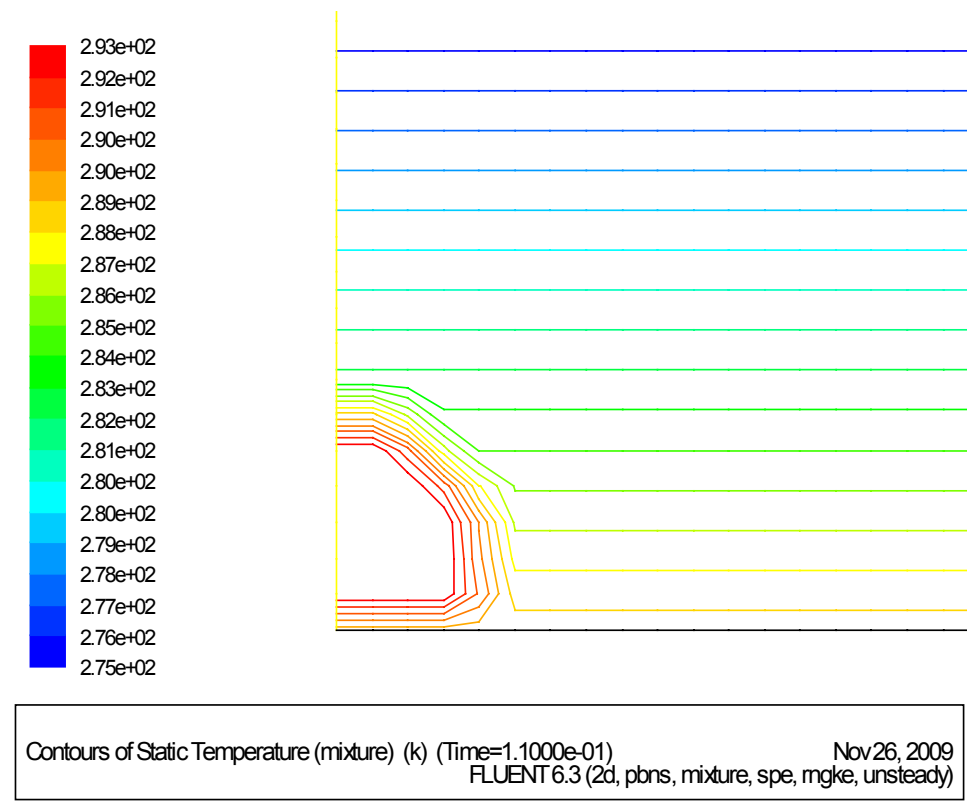
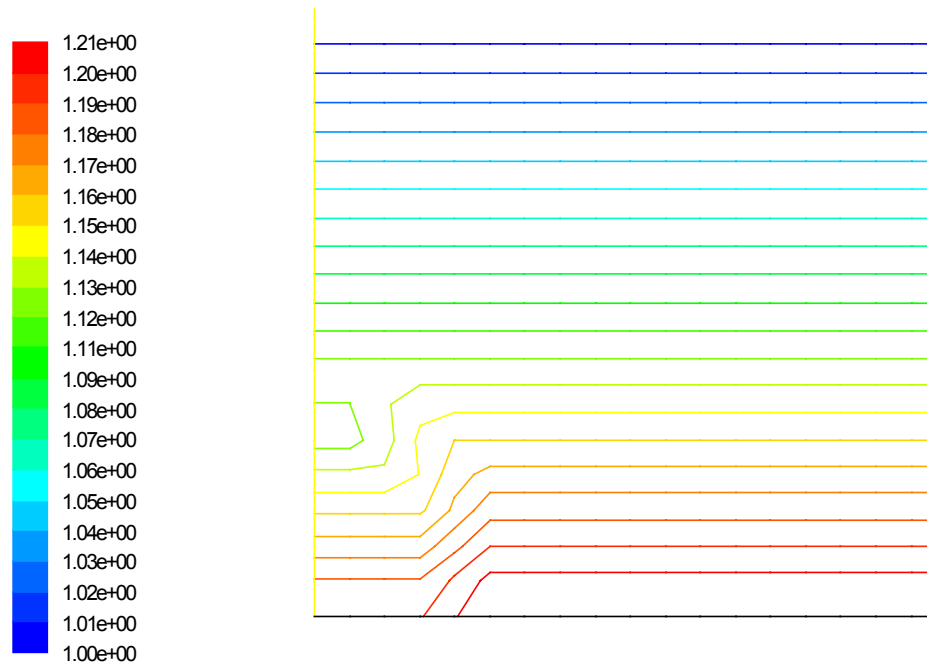


Figura 33.- Detalle del contorno inicial de temperatura. Caso húmedo

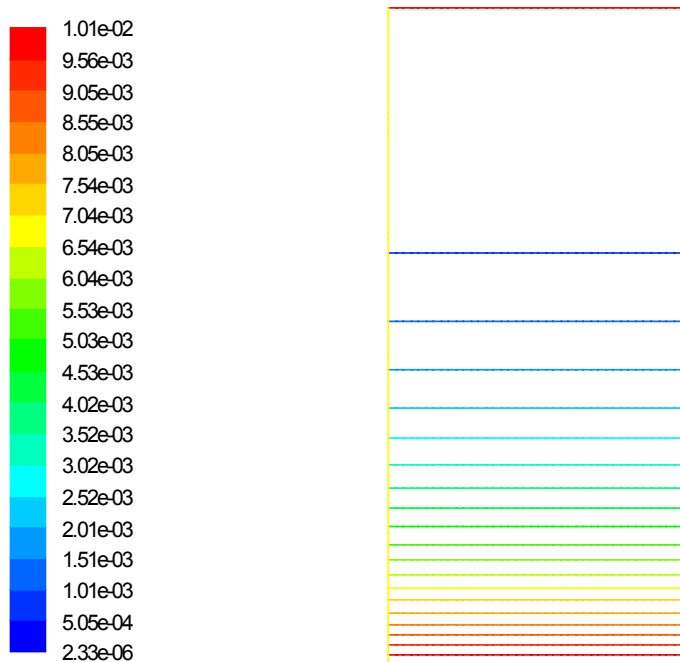


Contours of Density(mixture) (kg/m3) (Time=1.1000e-01)

Nov26, 2009

FLUENT 6.3 (2d, pbns, mixture, spe, mgke, unsteady)

Figura 34.- Detalle del contorno inicial de densidad. Caso húmedo



Contours of Mass fraction of h2o (aire-humedo) (Time=1.1000e-01)

Nov26, 2009

FLUENT 6.3 (2d, pbns, mixture, spe, mgke, unsteady)

Figura 35.- Contorno de la fracción másica inicial de vapor de agua. Caso húmedo

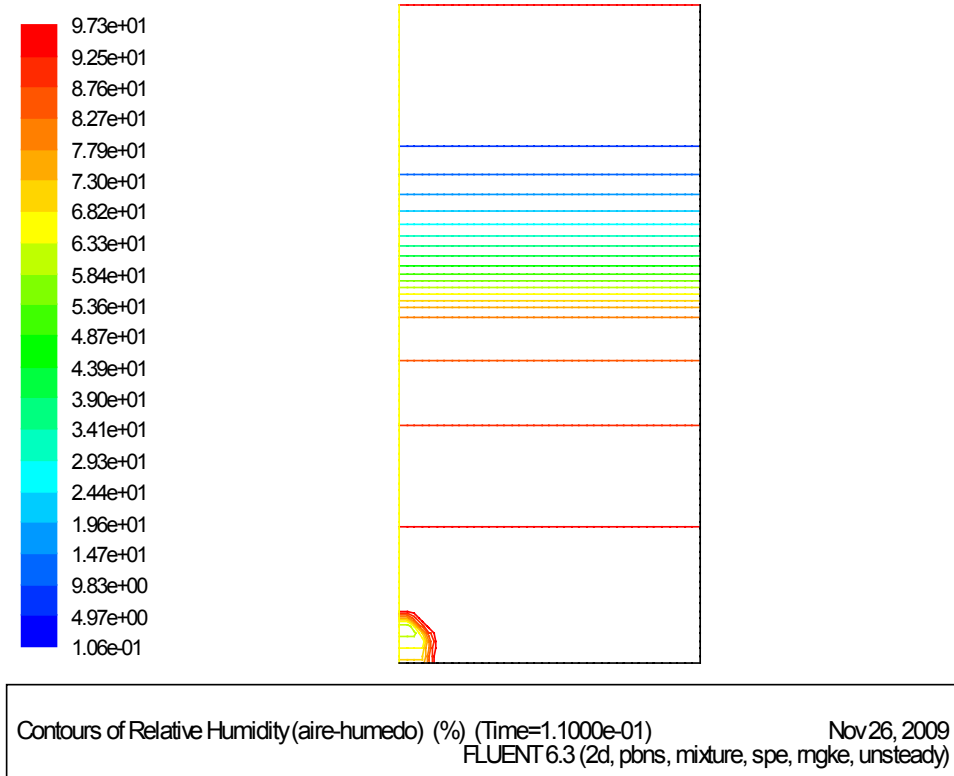


Figura 36.- Contorno inicial de humedad relativa. Caso húmedo

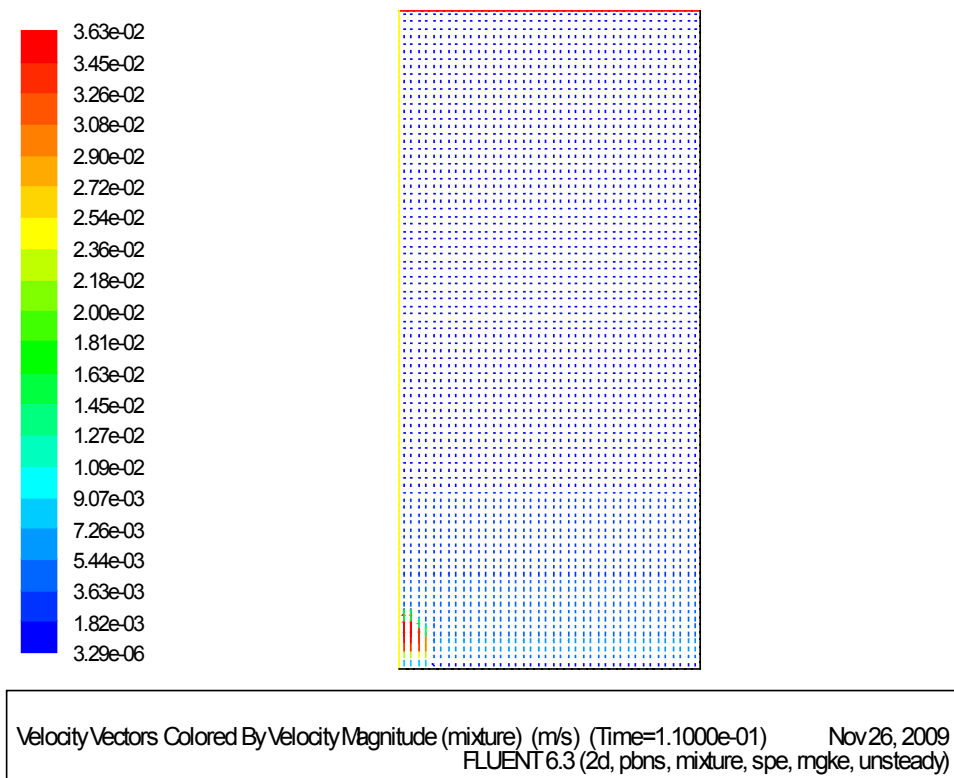


Figura 37.- Vectores iniciales de velocidades. Caso húmedo

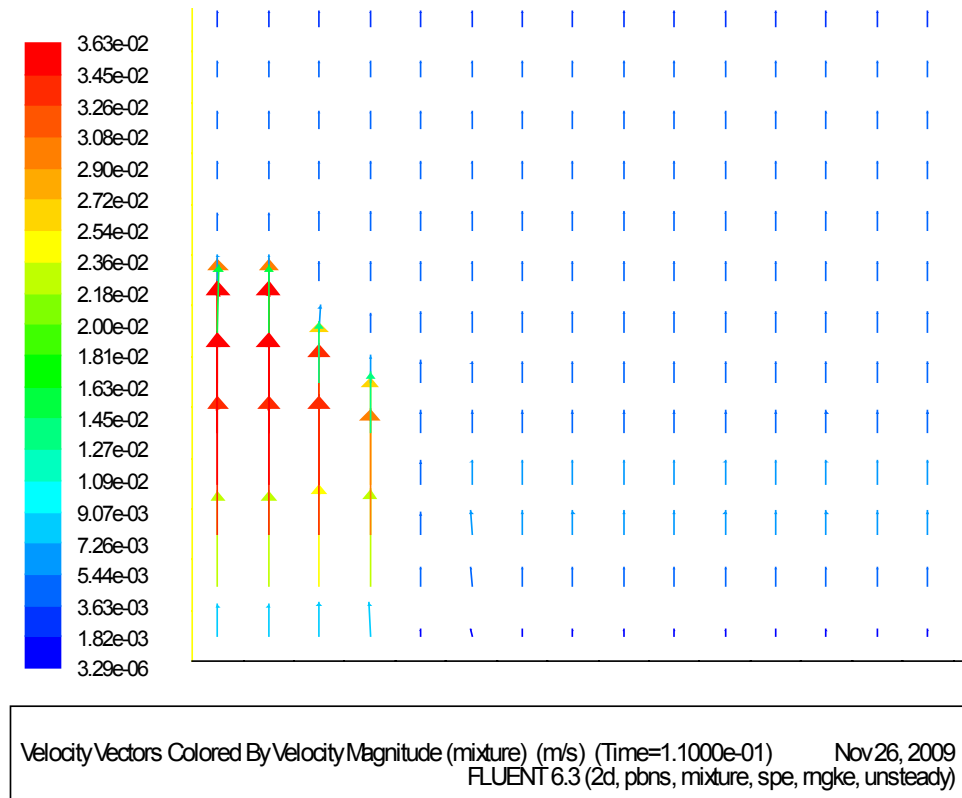


Figura 38.- Detalle de los vectores iniciales de velocidades. Caso húmedo

Se pueden observar en las ilustraciones anteriores que tanto la presión, temperatura, densidad y velocidades siguen la misma distribución que en caso seco.

Debido a que el fluido no es el mismo, aparecen nuevas propiedades y magnitudes que son las que precisamente son de nuestro interés. Especialmente es el contenido de vapor de agua inicial y la humedad relativa. Como se puede observar, la distribución inicial de vapor de agua presente en el aire está estratificada y depende únicamente de la altura a la que nos encontremos. Contrasta con la humedad relativa, que depende de la concentración de vapor de agua, pero también de la temperatura. De esta forma, la humedad relativa dentro de la térmica es más baja que en otro punto del dominio situado a la misma altura.

Pasemos a ver cómo evoluciona el flujo con el tiempo.

Tiempo=1.28 segundos

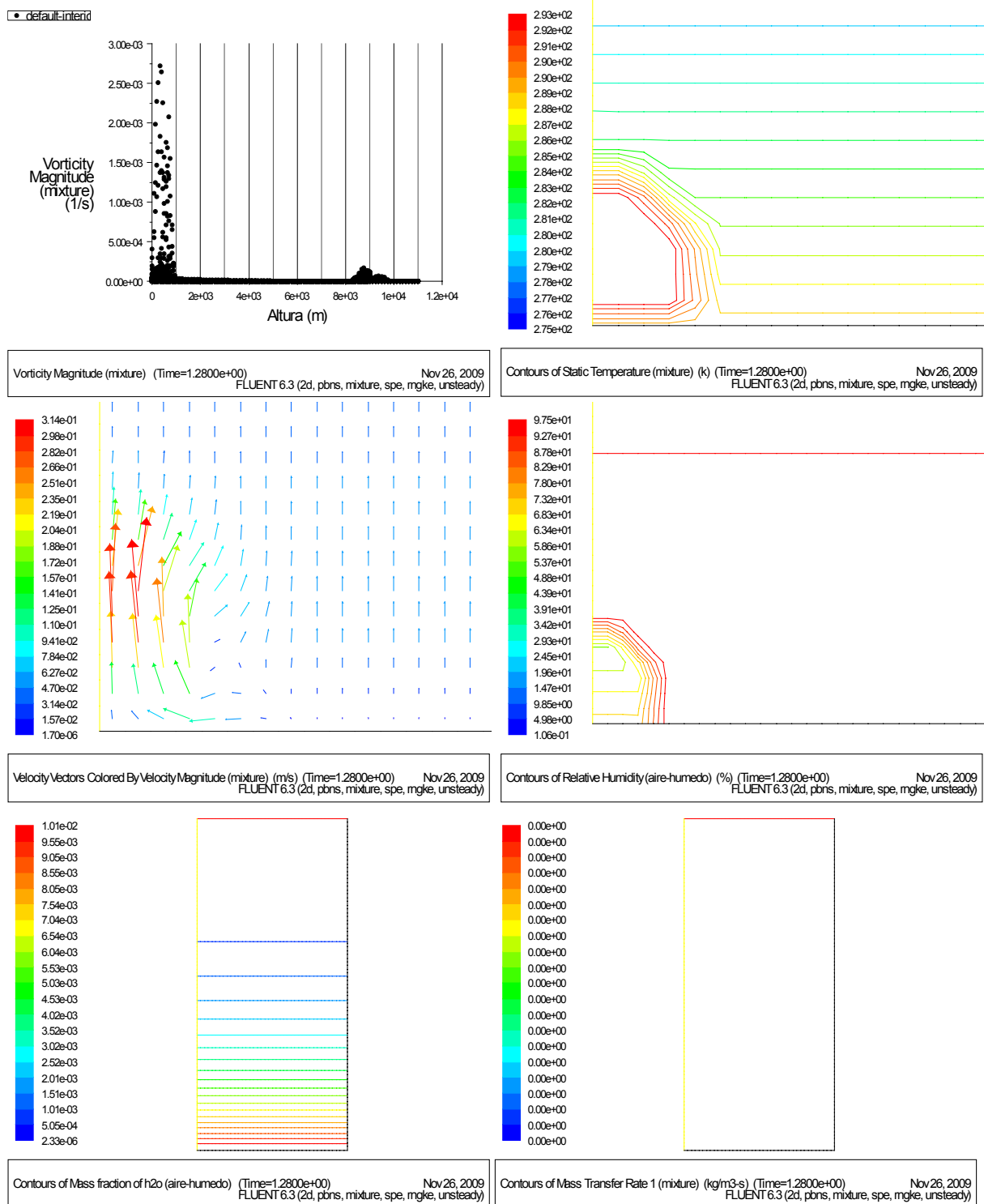


Figura 39.- Variables fluidas para t=1.28 s. Caso húmedo

Tiempo=9.28 segundos

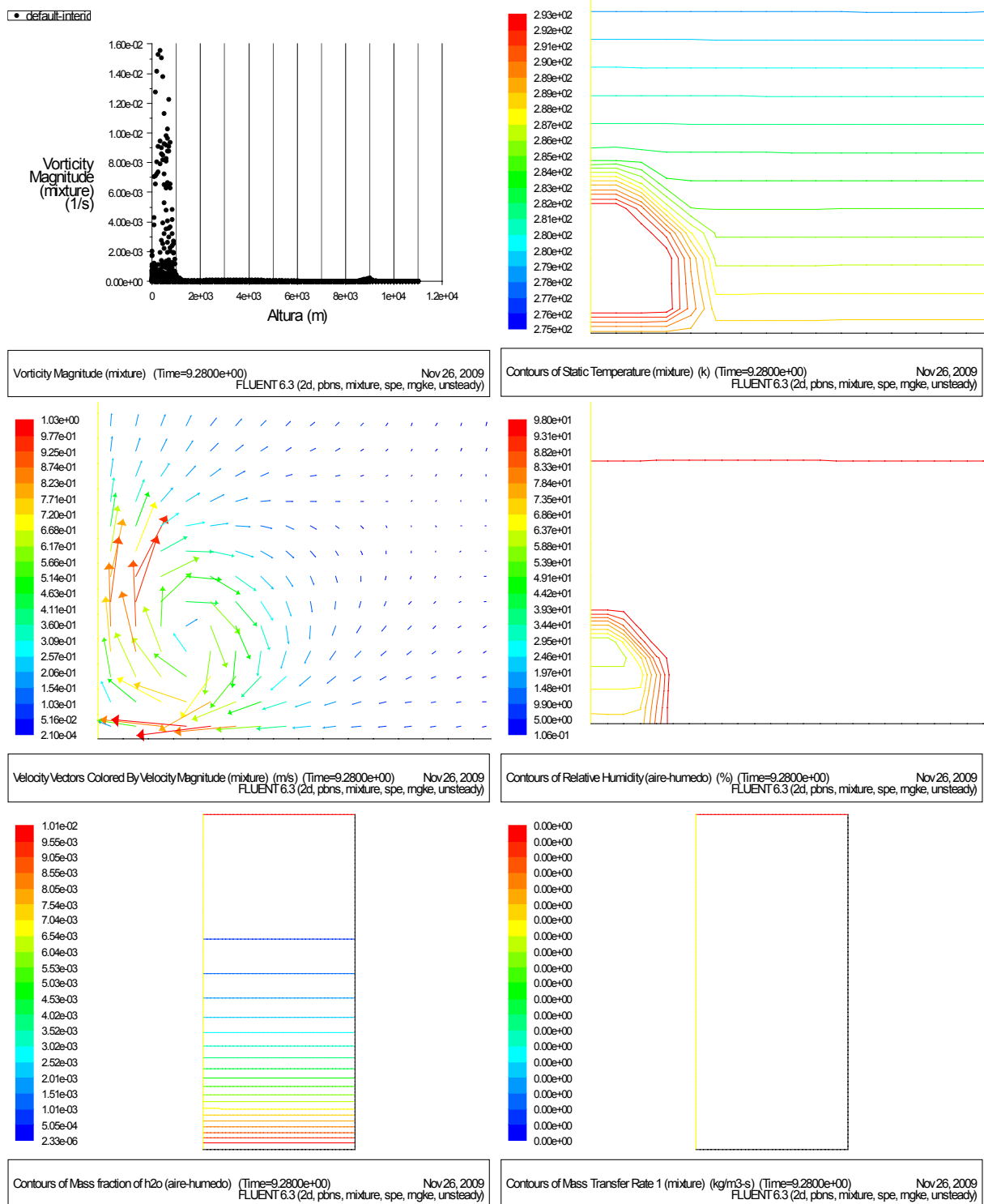


Figura 40.- Variables fluidas para t=9.28 s. Caso húmedo

Tiempo=39.28 segundos

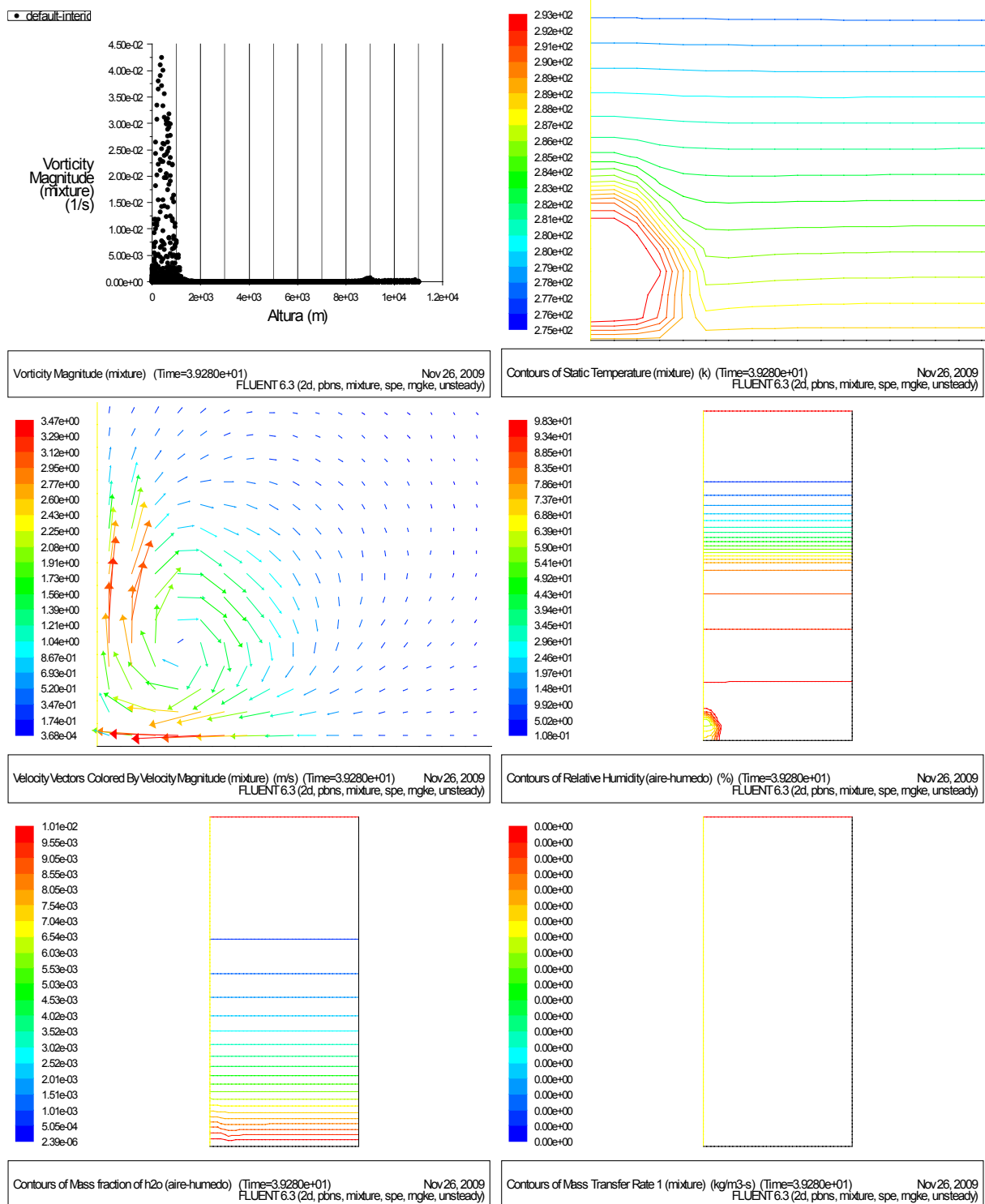


Figura 41.- Variables fluidas para t=39.28 s. Caso húmedo

Tiempo=69.28 segundos

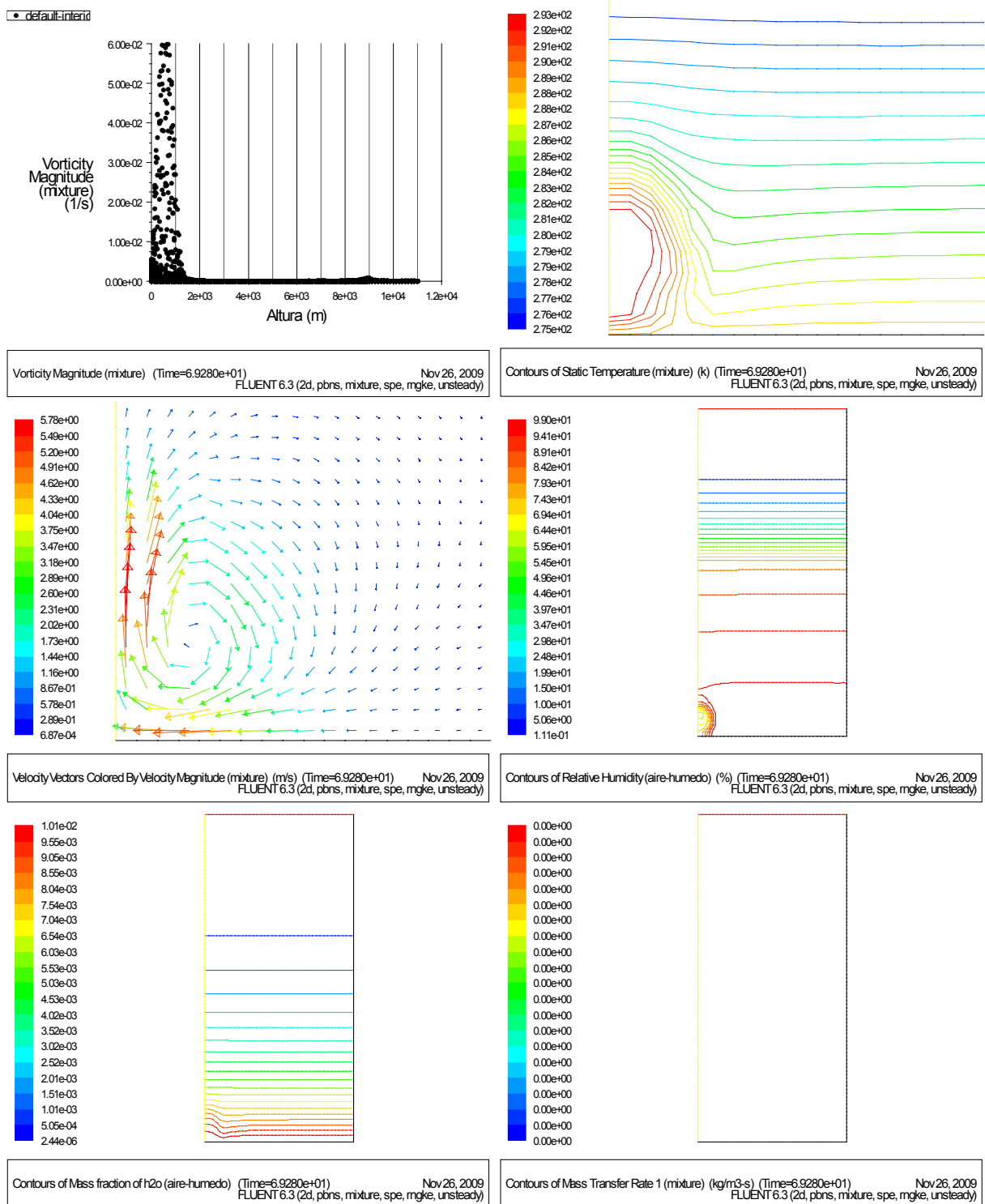
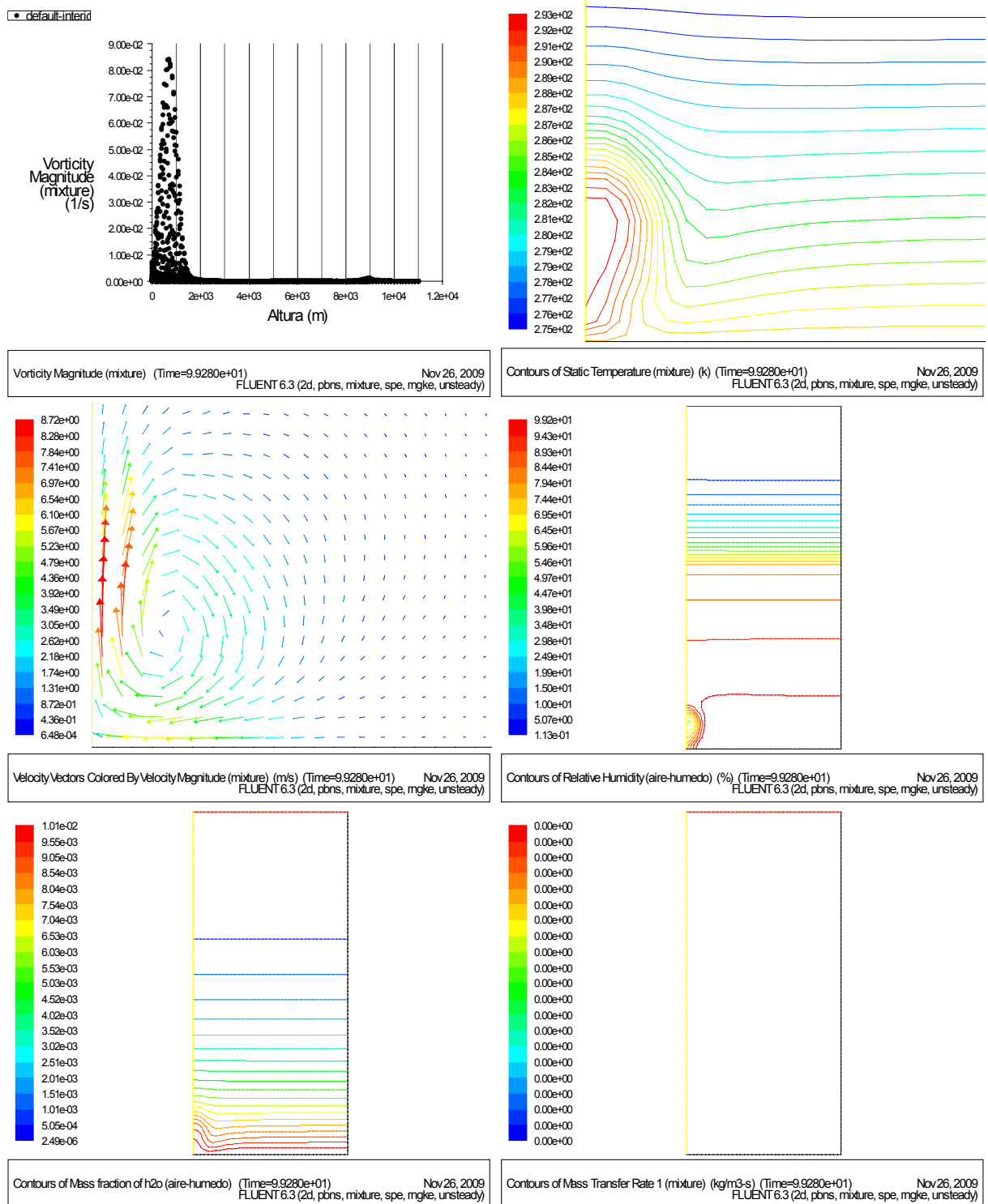
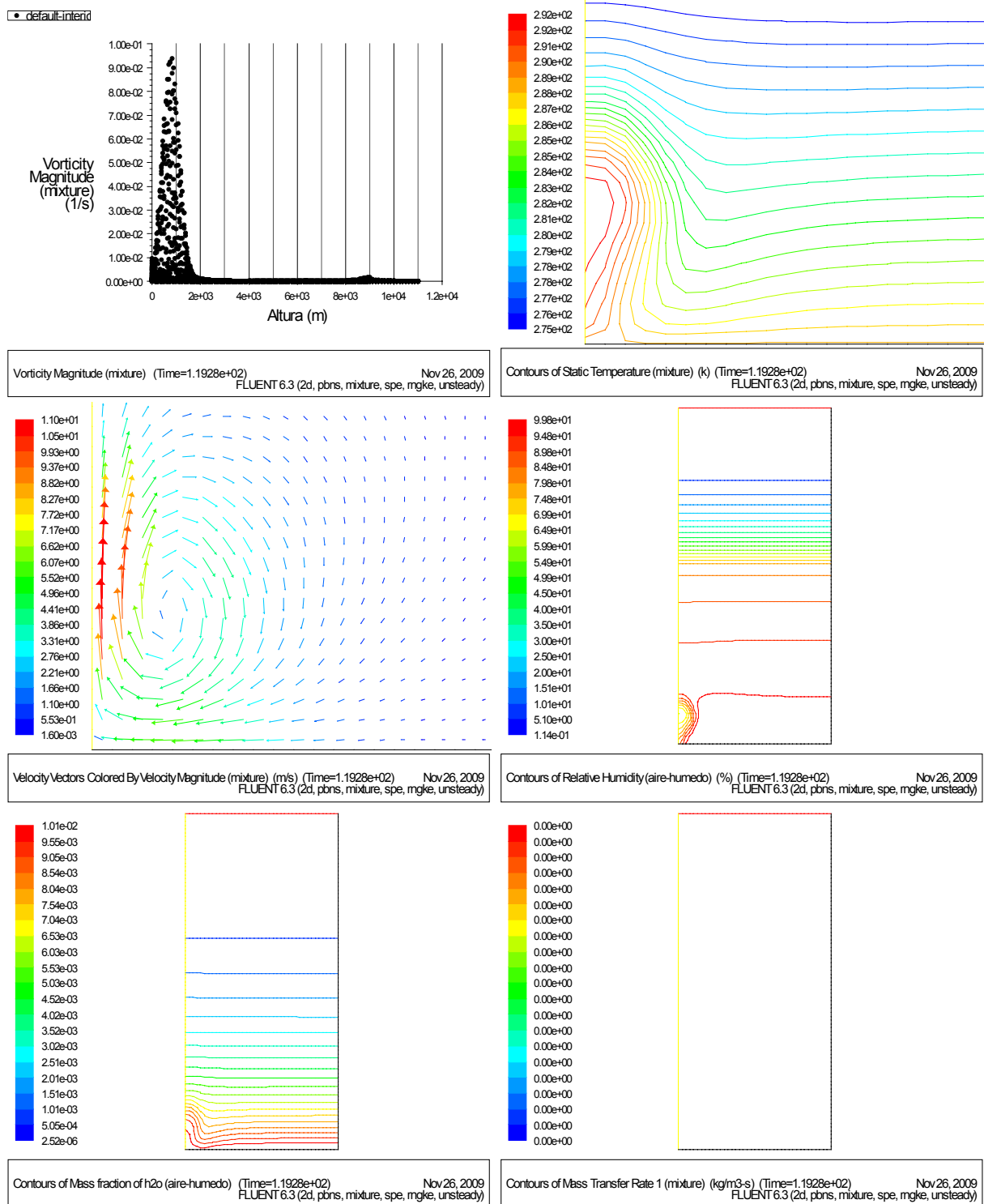


Figura 42.- Variables fluidas para t=69.28 s. Caso húmedo

Tiempo=99.28 segundos

Figura 43.- Variables fluidas para $t=99.28$ s. Caso húmedo

Tiempo=119.28 segundos

Figura 44.- Variables fluidas para $t=119.28$ s. Caso húmedo

Tiempo=159.28 segundos

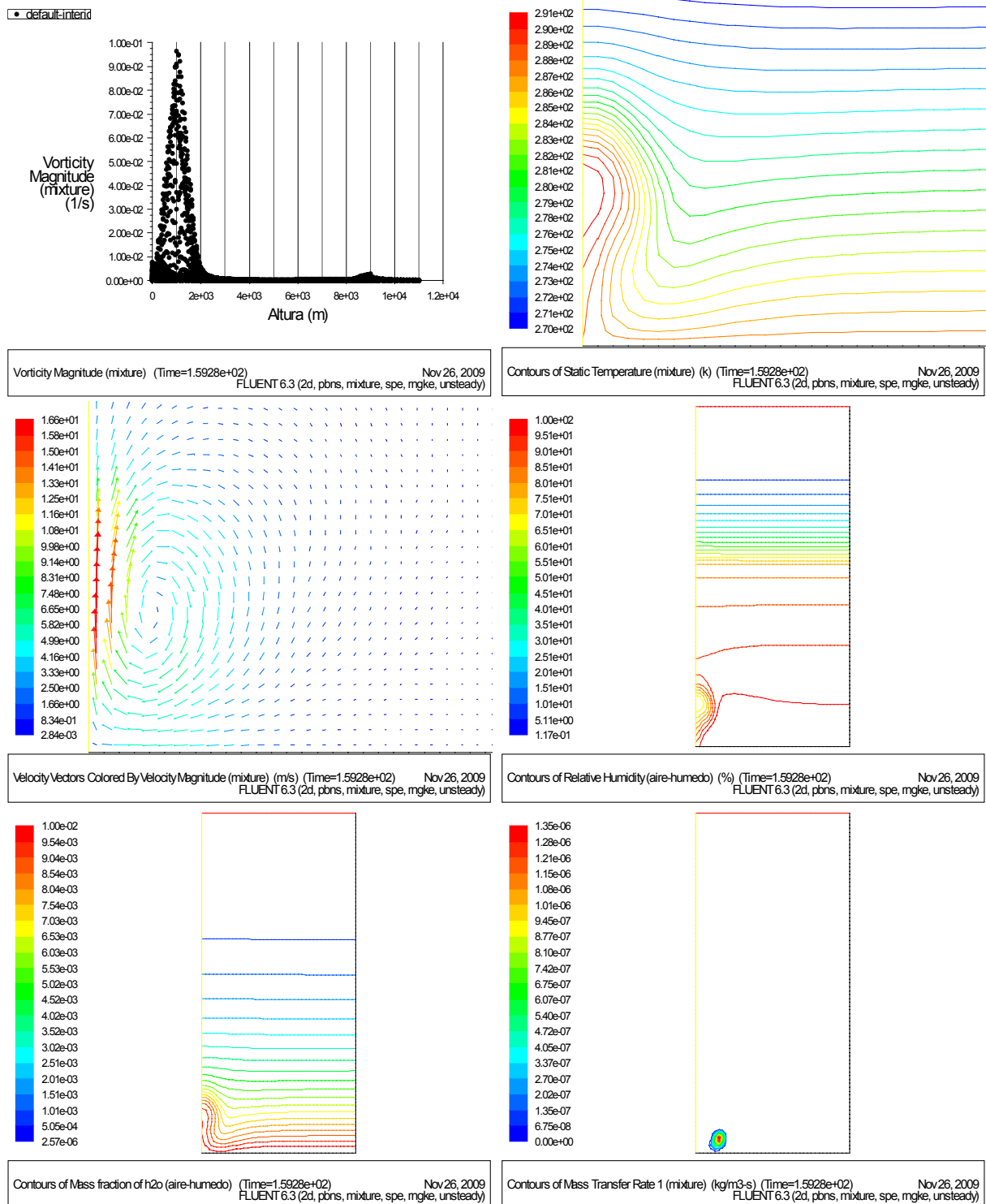


Figura 45.- Variables fluidas para t=159.28 s. Caso húmedo

Tiempo=199.28 segundos

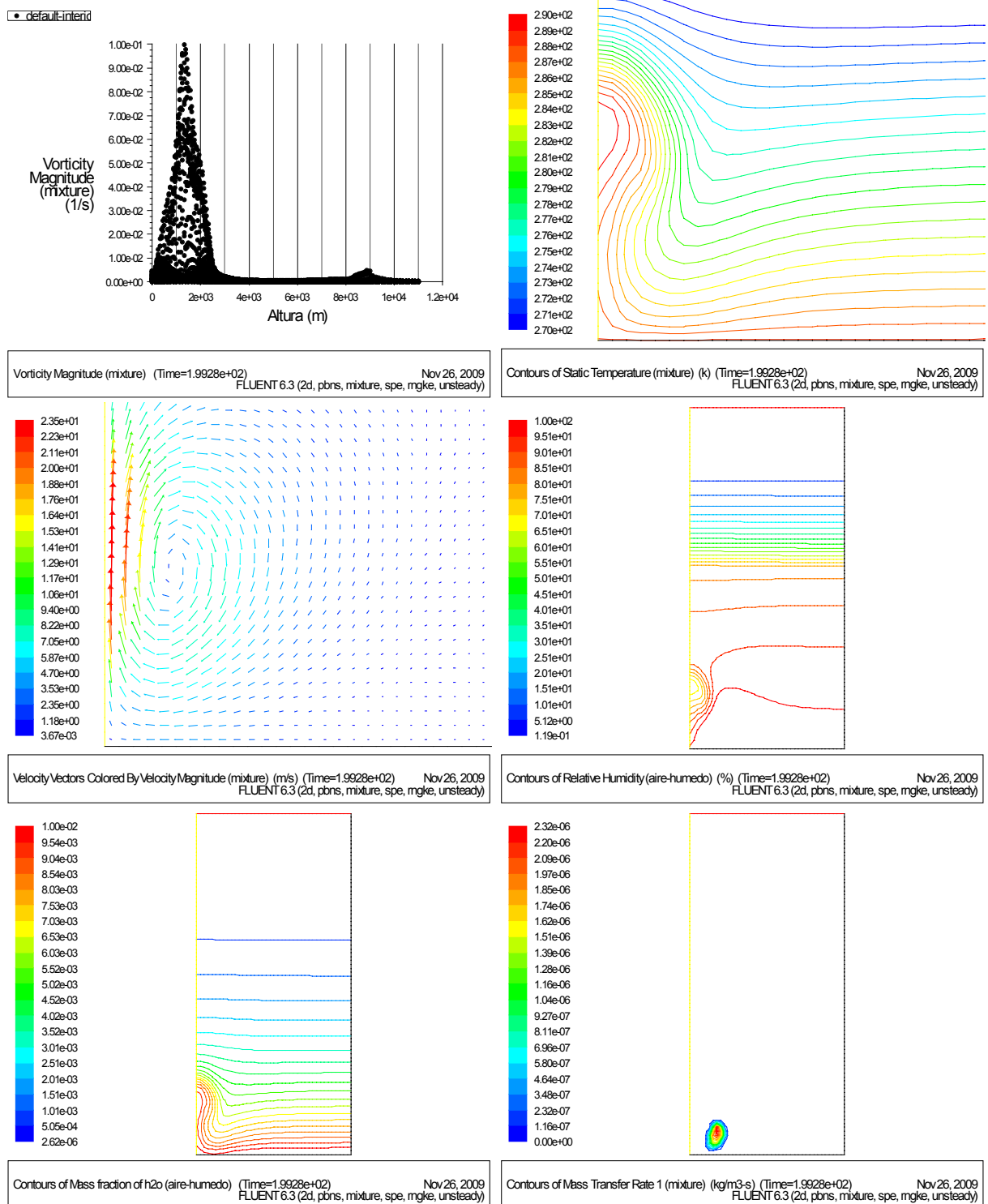


Figura 46.- Variables fluidas para t=199.28 s. Caso húmedo

Tiempo=249.28 segundos

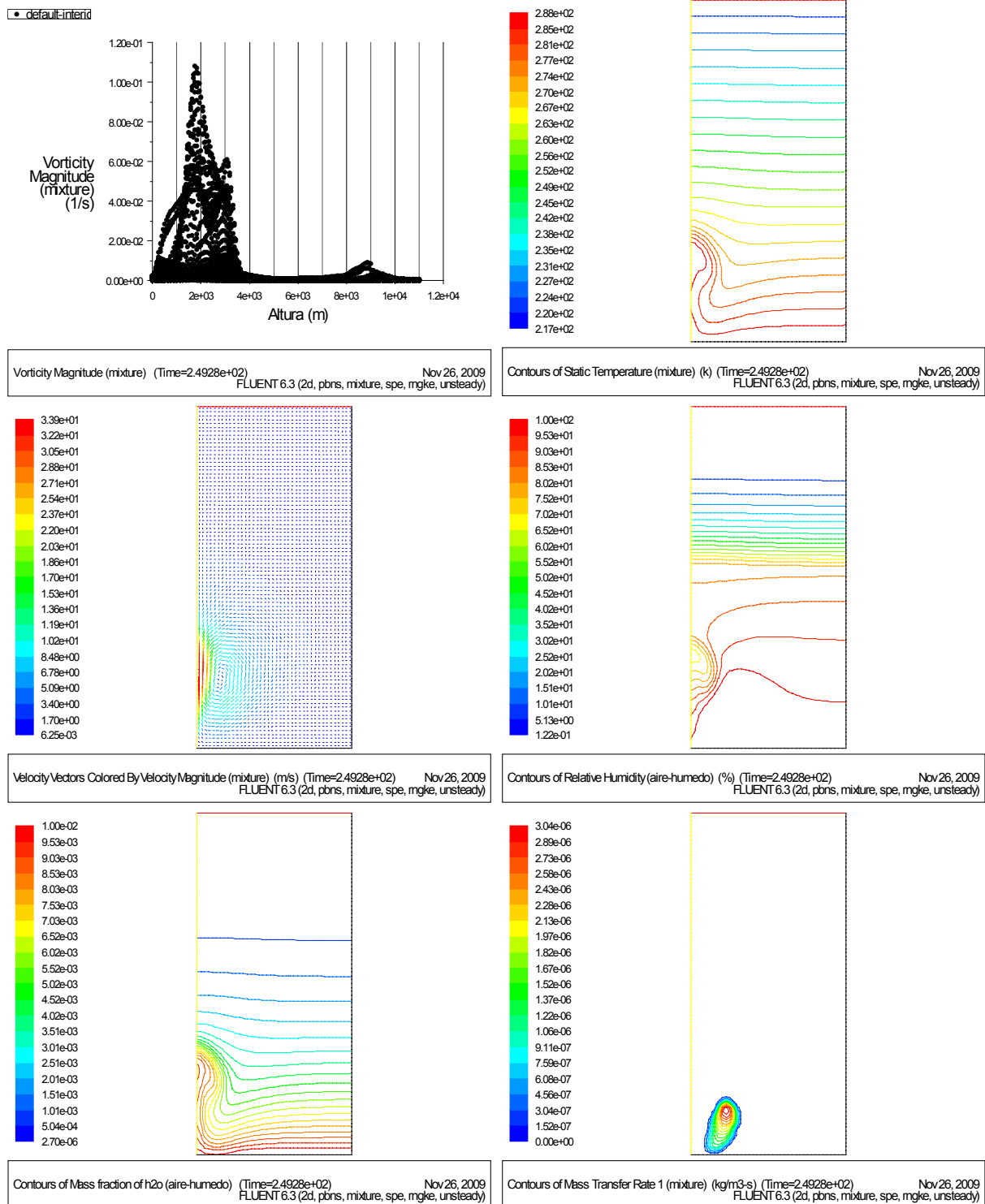


Figura 47.- Variables fluidas para t=249.28 s. Caso húmedo

Tiempo= 299.28 segundos

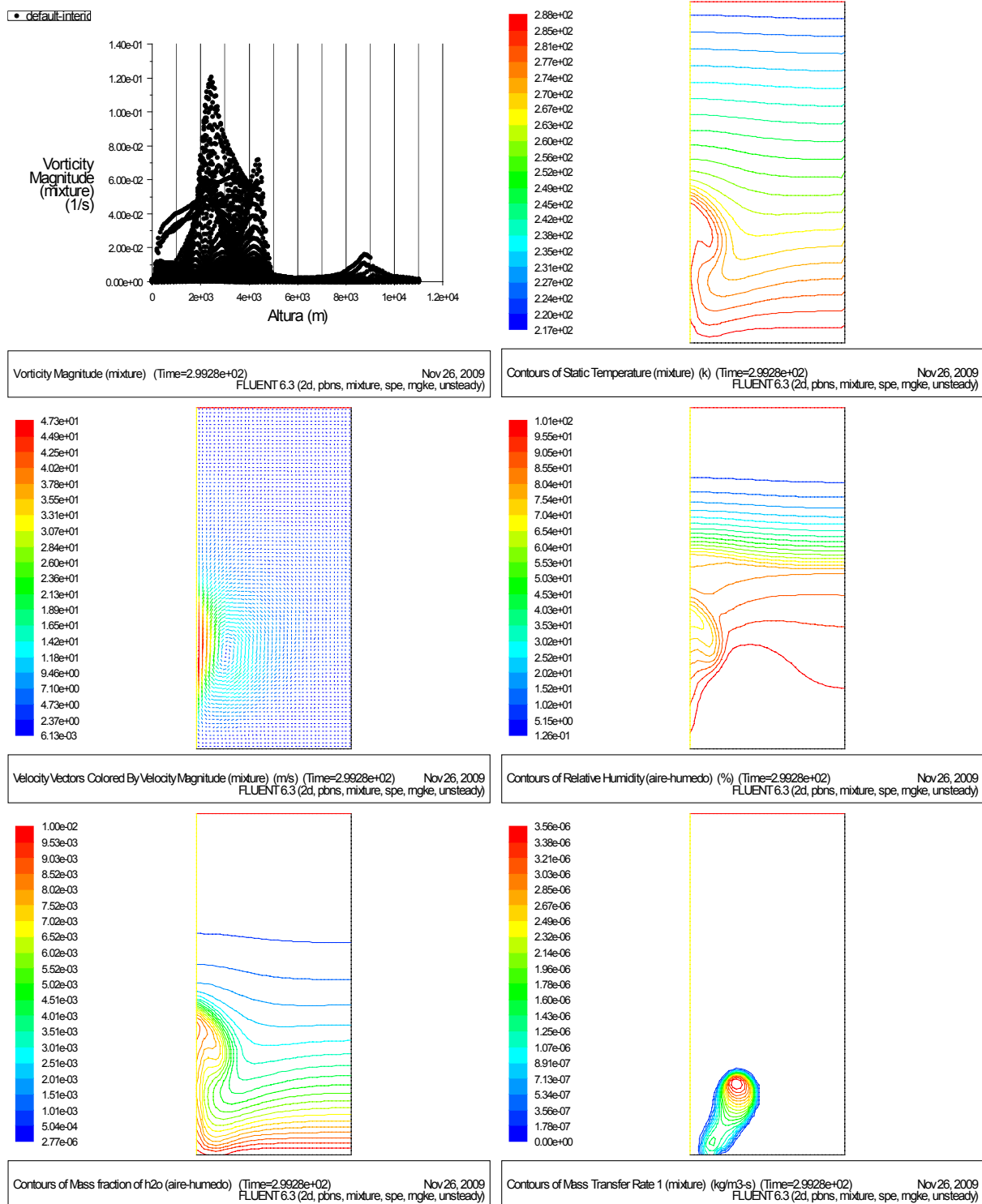
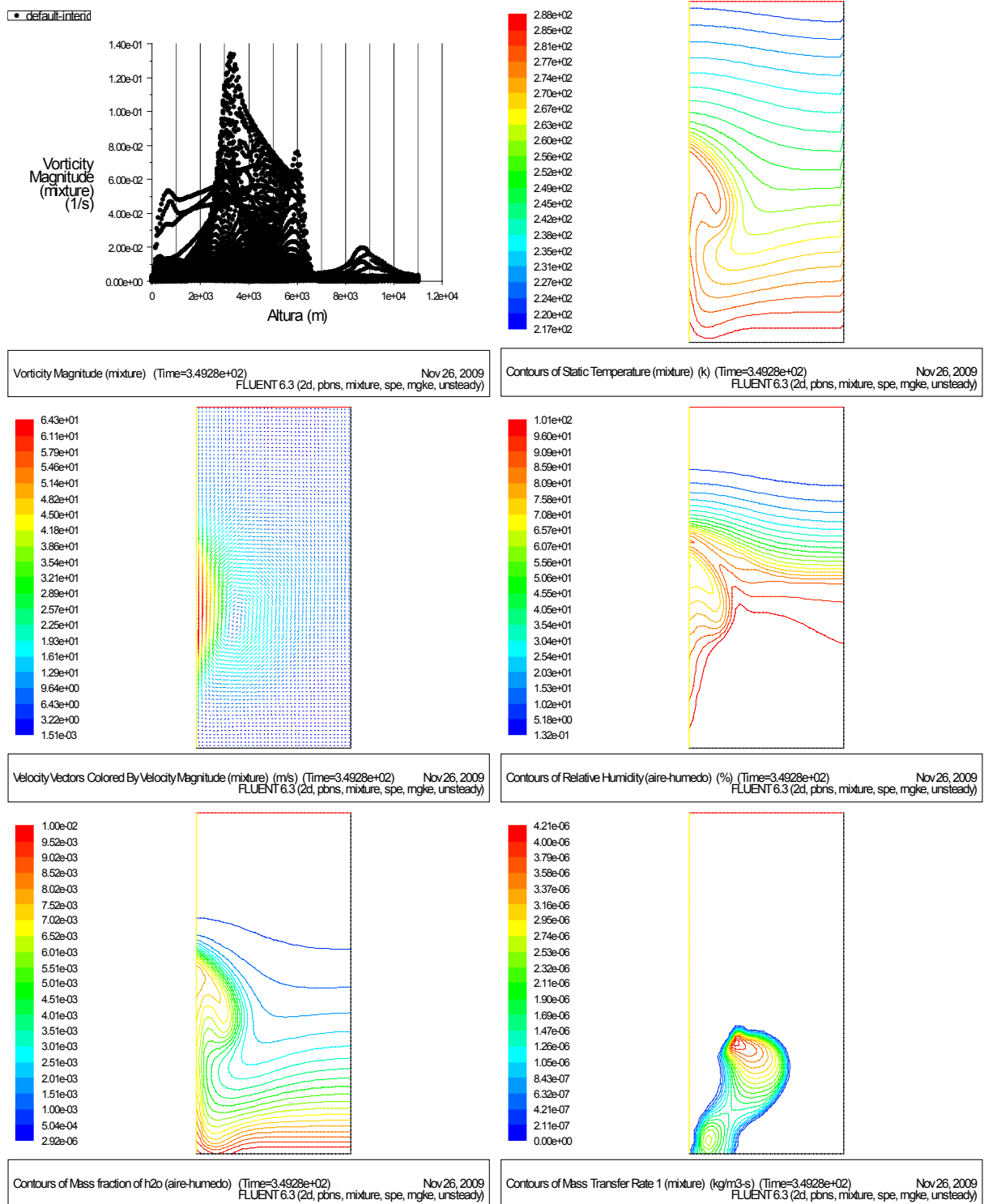


Figura 48.- Variables fluidas para t=299.28 s. Caso húmedo

Tiempo=349.28 segundos

Figura 49.- Variables fluidas para $t=349.28$ s. Caso húmedo

Tiempo=399.28 segundos

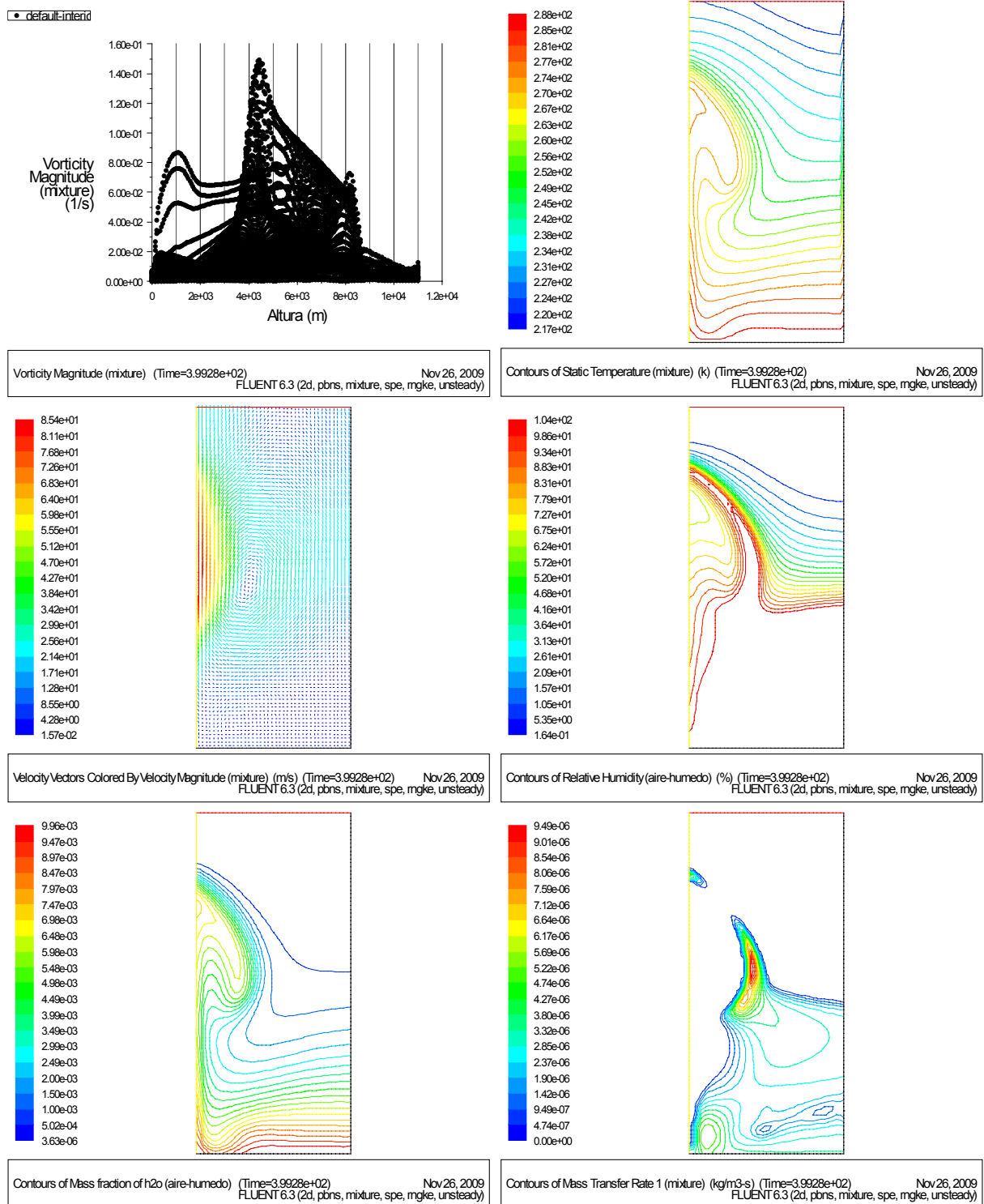


Figura 50.- Variables fluidas para t=399.28 s. Caso húmedo

En la evolución temporal del flujo, se puede contemplar como la temperatura, la velocidad y la altura de la térmica evolucionan de la misma forma que en el problema seco.

Se han obviado los gráficos de la densidad y de la presión por no aportar nada nuevo a la simulación, siguiendo la misma evolución y prácticamente idénticos valores que en el problema seco.

La variación del contenido de vapor de agua con el tiempo y el espacio sigue el movimiento de la térmica. En el momento inicial está perfectamente estratificado con la altura, pero según se eleva el flujo se puede contemplar cómo la zona correspondiente a la térmica tiene mayor cantidad de vapor de agua que otro punto situado a la misma altura pero fuera de la zona de acción del flujo.

En cuanto a la condensación, se produce en zonas que tienen una alta concentración de vapor de agua y baja temperatura (humedad relativa por encima del 100%). La condensación se inicia en $t=143$ segundos.

De hecho, para ilustrar mejor el lugar donde se produce la condensación, se muestran a continuación los vectores de velocidad del flujo coloreados según la condensación y según la temperatura en el instante $t=259.28$ segundos.

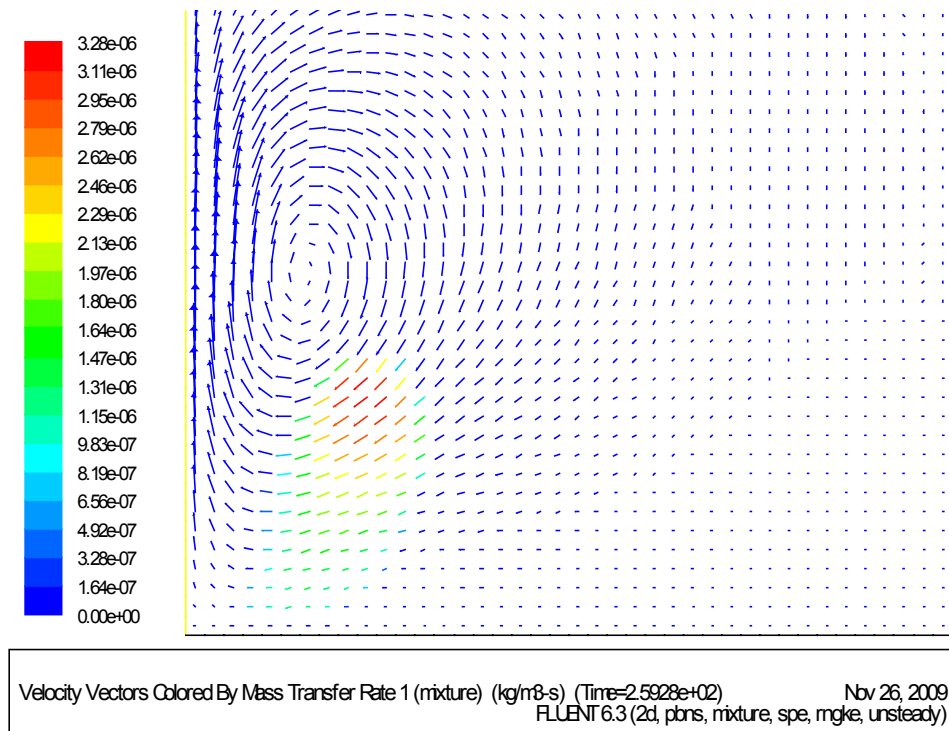


Figura 51.- Contornos de velocidad coloreados según la condensación para $t=259.28$ s

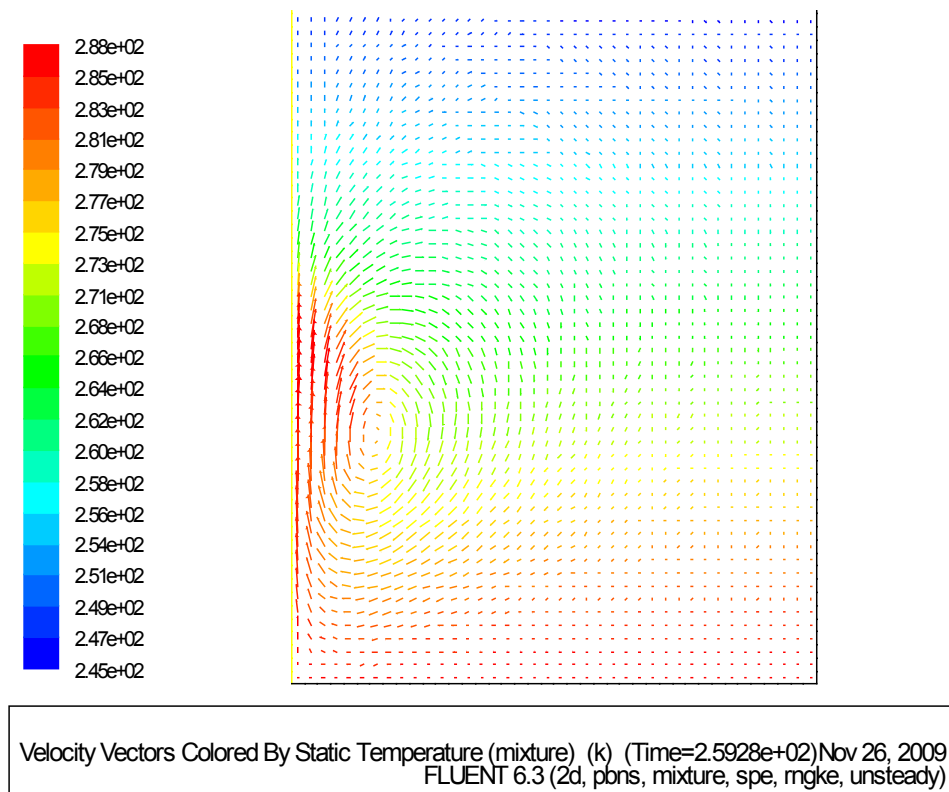
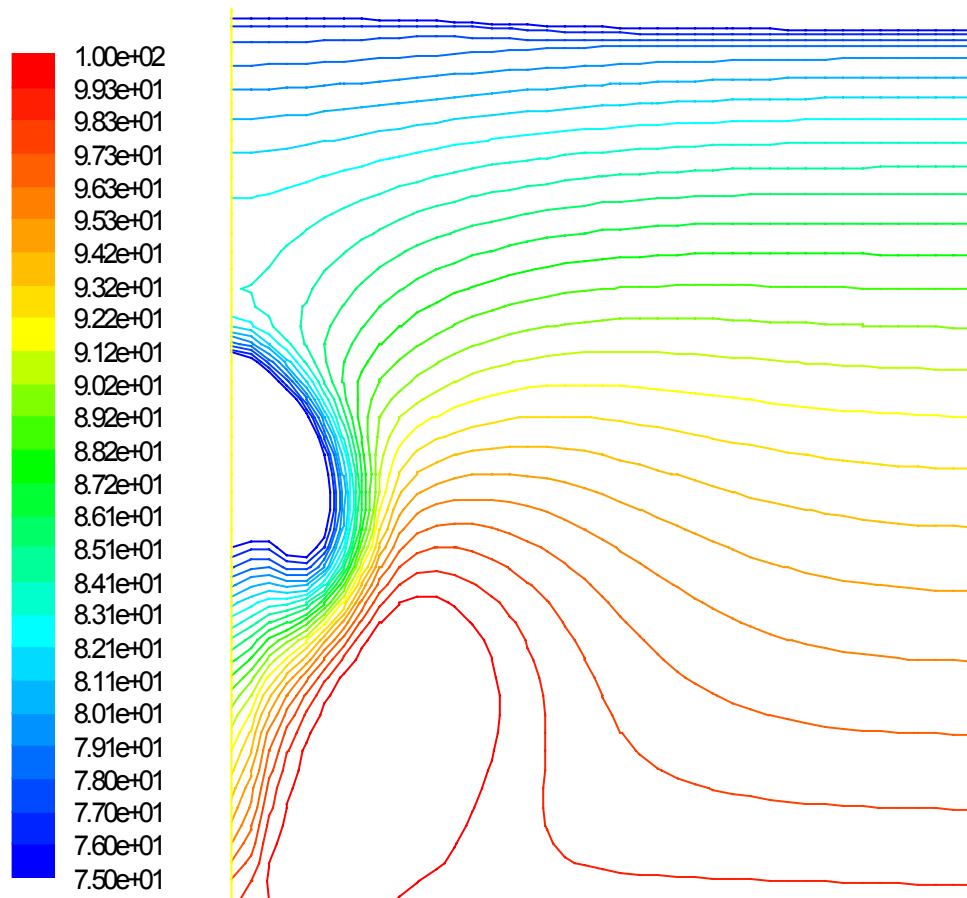


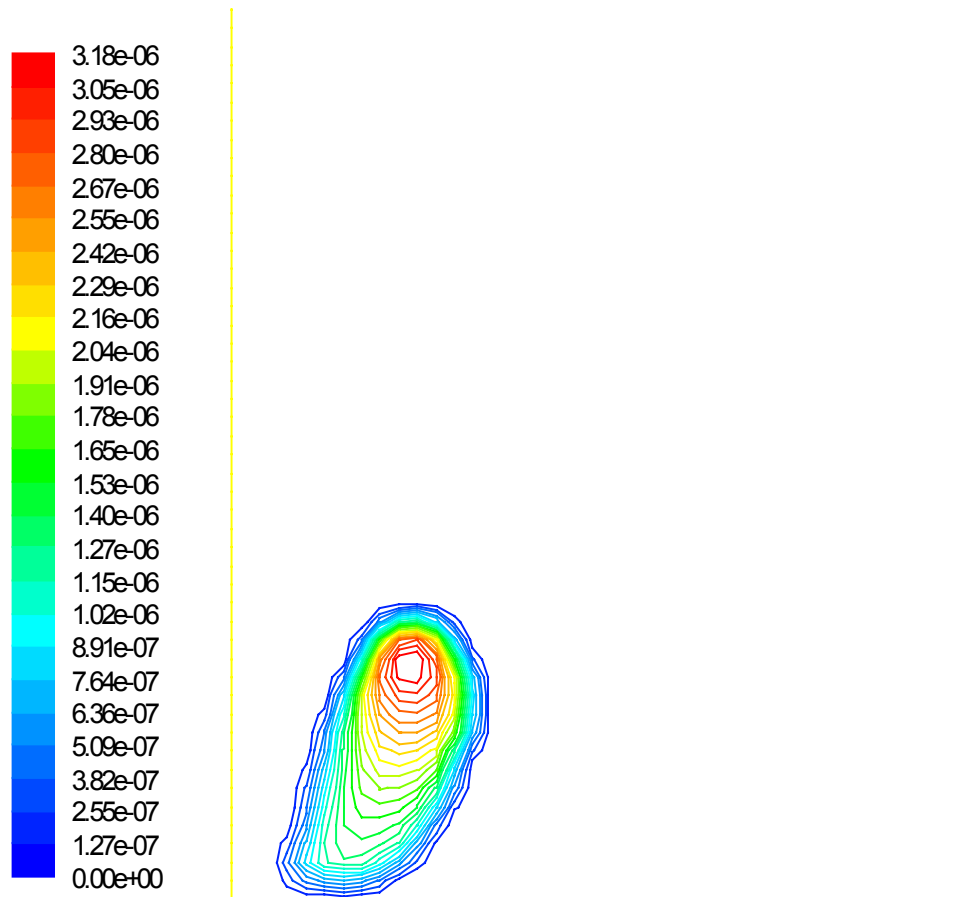
Figura 52.- Contornos de velocidad coloreados según la temperatura para $t=259.28$ s

Así mismo, mostraremos dos contornos de mayor precisión en los que se puede apreciar cómo la condensación se produce en la zona de humedad relativa superior al 100%.



Contours of Relative Humidity (aire-humedo) (%) (Time=2.5928e+02) Nov 26, 2009
FLUENT 6.3 (2d, pbns, mixture, spe, rngke, unsteady)

Figura 53.- Contornos de humedad relativa para $t=259.28$ segundos



Contours of Mass Transfer Rate 1 (mixture) (kg/m³-s) (Time=2.5928e+02)
 FLUENT 6.3 (2d, pbns, mixture, spe, mgke, unsteady)

Figura 54.- Contornos de condensación para $t=259.28$ segundos

A continuación se muestra la misma tabla que en el caso seco con la velocidad pico, la altura y la velocidad de ascensión de la térmica en función de tiempo transcurrido.

Tiempo [s]	Velocidad máxima [m/s]	Altura de la térmica [m]	Velocidad de ascenso [m/s]
0,11	0.0363	250	-
1,28	0.314	250	0,00
9,28	1.03	300	6,25
39,28	3.47	375	2,50
69,28	5.78	650	9,17
99,28	8.72	700	1,67
119,28	11.1	800	5,00
159,28	16.6	1000	5,00
199,28	23.5	1350	8,75
249,28	33.9	1750	8,00
299,28	47.3	2450	14,00
349,28	101	3250	16,00
399,28	85.4	4450	24,00
449,28	-	5700	25,00

Se aprecia la misma tendencia en la evolución de la térmica que en el problema con aire seco como único fluido.

7.2.2. Conclusiones parciales

El gradiente en la concentración de vapor de agua que se produce durante el ascenso de la térmica es un fenómeno muy importante ya que va a ser precisamente el va a dar lugar a la condensación. Al recircular y ascender el aire de la térmica que al principio de la simulación se encontraba en el suelo (zona más rica en vapor de agua), arrastra consigo el vapor que contenía inicialmente.

Como se explicó en el análisis del caso seco, la rotación de la térmica en torno al centro de vorticidad, propicia que la parte exterior descendente, al estar en contacto y mezclarse con el aire de la atmósfera, se enfríe. Debido a que esta zona tiene una alta concentración de vapor de agua por lo explicado en el párrafo anterior, al enfriarse alcanza condiciones de saturación (humedad relativa=100%) dando lugar a la transferencia de masa entre el vapor y el agua líquida (condensación).

En cuanto a los contornos de humedad relativa, llegan a aparecer valores de dicho parámetro de hasta el 104 %, que pese a ser posibles en la atmósfera, no lo hemos contemplado en nuestro modelo. Esto es debido, a que llegados al momento donde comienza a producirse la condensación, esta ocurre de forma lenta ya que en la fórmula que modelaba dicha transferencia de masa se incluyó un término desacelerador de la reacción, ya que de otro modo no era posible captar en gráficos el proceso de condensación. Lo que ocurre, al realizarse la condensación de una manera lenta, es que hay mayor cantidad de aire húmedo que alcanza condiciones de saturación que la que el modelo es capaz de condensar. Esto no supone ningún problema ni ninguna distorsión del resto de propiedades, ya que como se ha comentado, la atmósfera en ocasiones alcanza valores de humedad relativa superiores al 100%.

De hecho, se esperaba que el vapor de agua condensase en la parte inferior y central de la térmica, dejando una estela prácticamente recta. Después de comprender los resultados, parece más lógico que la transferencia de masa se produzca en el lugar que ha condensado, pues es una zona con alta concentración de vapor de agua y baja temperatura.

7.3.RESULTADOS COMPARATIVOS

A la vista de los datos obtenidos por separado en cada uno de los casos, llega el momento de hacer un análisis comparativo entre los pocos datos cuantitativos hallados. A continuación se presenta la evolución comparada de la térmica para ambos casos.

Tiempo [s]	Velocidad máxima [m/s]	Altura de la térmica [m]	Velocidad de ascenso [m/s]	Tiempo [s]	Velocidad máxima [m/s]	Altura de la térmica [m]	Velocidad de ascenso [m/s]
0,11	0,0322	250	-	0,11	0.0363	250	-
1,28	0,265	250	0,00	1,28	0.314	250	0,00
9,28	1,28	300	6,25	9,28	1.03	300	6,25
39,28	5	375	2,50	39,28	3.47	375	2,50
69,28	7,51	625	8,33	69,28	5.78	650	9,17
99,28	9,24	675	1,67	99,28	8.72	700	1,67
119,28	11,4	775	5,00	119,28	11.1	800	5,00
159,28	17,5	950	4,38	159,28	16.6	1000	5,00
199,28	24,1	1250	7,50	199,28	23.5	1350	8,75
249,28	35,3	1650	8,00	249,28	33.9	1750	8,00
299,28	52	2375	14,50	299,28	47.3	2450	14,00
349,28	76,2	3150	15,50	349,28	101	3250	16,00
399,28	108	4200	21,00	399,28	85.4	4450	24,00
449,28	-	5400	24,00	449,28	-	5700	25,00

Nota: La línea por debajo del instante $t=119.28$ segundos marca el inicio de la condensación en el caso del problema con vapor de agua

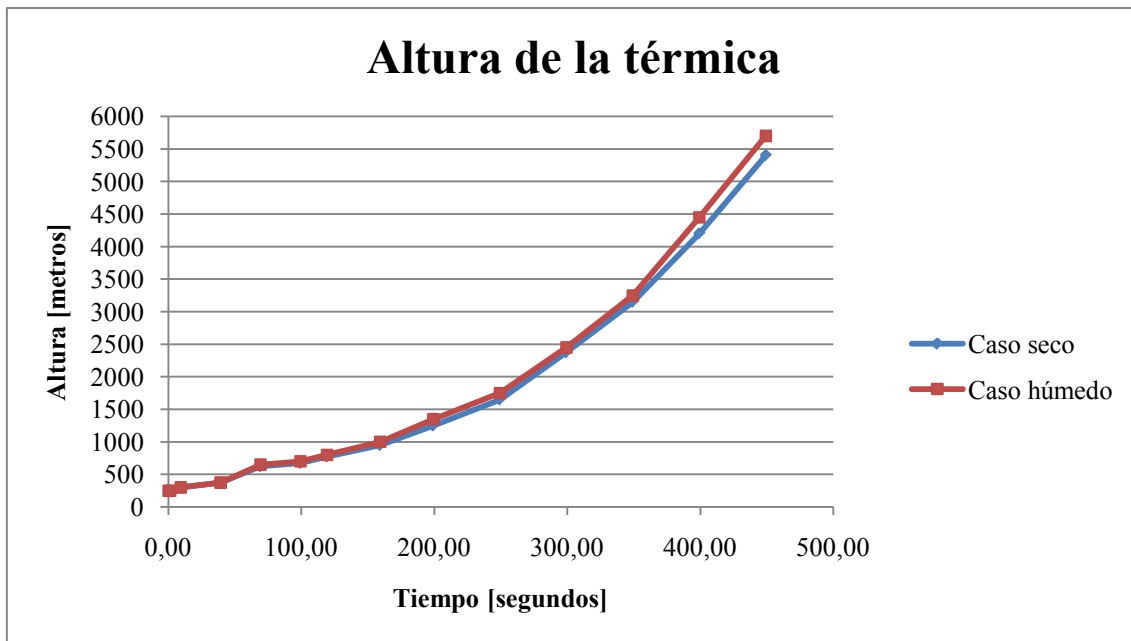


Figura 55.- Altura de la térmica

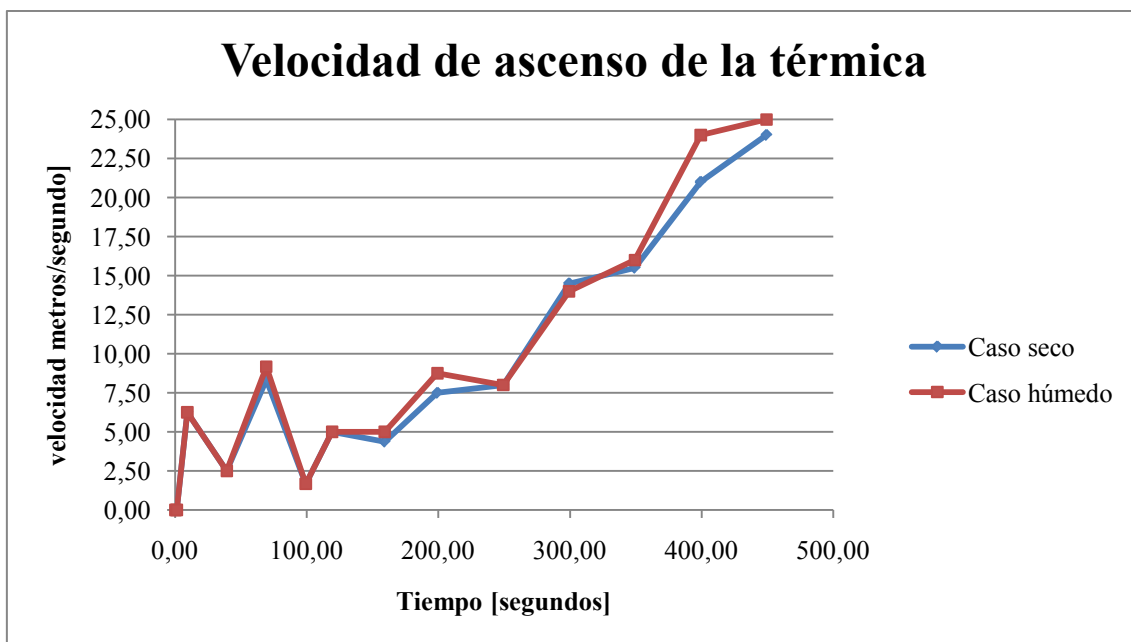


Figura 56.- Velocidad de ascenso de la térmica

Solo reseñar, que la evolución de la térmica en ambos casos es pareja y apenas se aprecia diferencia entre el caso húmedo y el seco. Ahora bien, se puede observar que la térmica húmeda asciende ligeramente más rápido que la seca en la parte final de la simulación.

7.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CONVERGENCIA

Tanto para el caso seco como para el húmedo, el análisis de los residuos indica que la solución converge en todas las ecuaciones. El criterio de convergencia utilizado es el establecido por FLUENT por defecto. Es decir, los residuos de cada ecuación deben ser menores que 10^{-3} , excepto en la ecuación de la energía que debe ser de 10^{-6} .

En ambos casos, la solución converge en cada uno de los pasos temporales, tardando entre 6 y 7 iteraciones en alcanzar dicha convergencia.

El tiempo de simulación del caso seco fue de una hora y en el caso con condensación fue de dos horas y media.

Se muestra a continuación un gráfico con los residuos de la ecuación de continuidad para el caso seco, que son los que habitualmente tardan más en converger.

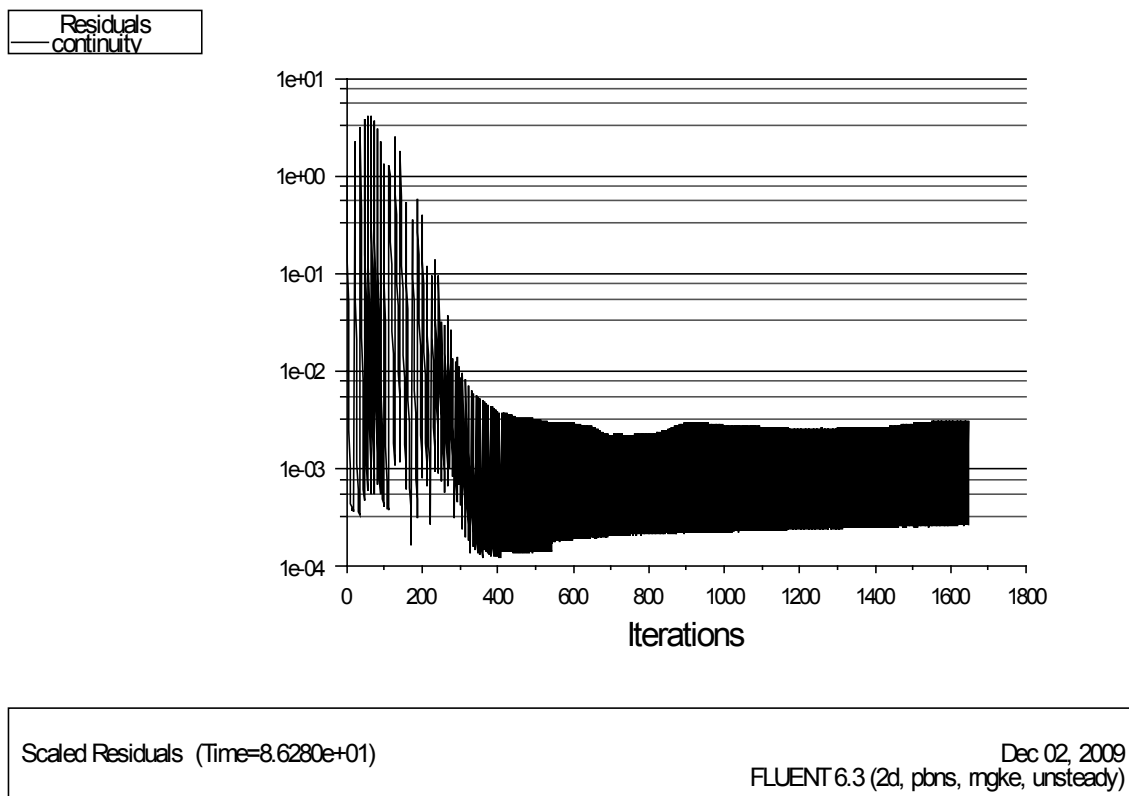
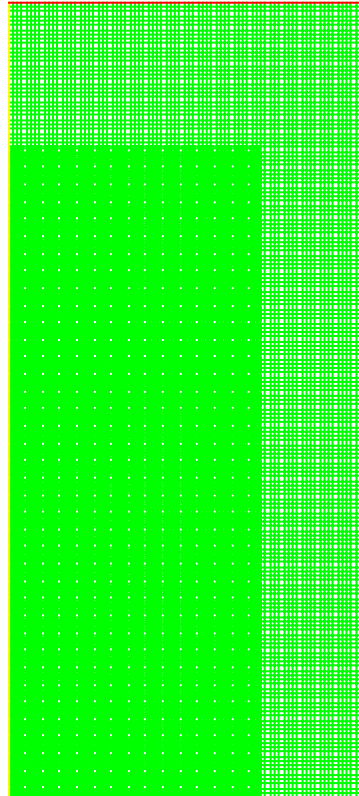


Figura 57.- Residuos de la ecuación de continuidad para el caso seco.

Para comprobar la validez de los datos, se hace una tercera simulación sobre el caso seco, pero refinando la malla y haciendo más pequeño el paso temporal. El refinamiento de la malla se realiza sobre todo el dominio. Cada celda se divide en cuatro, de manera que la zona comprendida entre 0 y 3500 metros en el eje horizontal y hasta una altura de 9000 metros, dispone de celdas cuadradas de 31.25 metros. Fuera de esta región, la longitud del lado de las celdas es de 62.5 metros. El número total de celdas es de 38272.



Grid (Time=0.0000e+00)

Dec 02, 2009
FLUENT 6.3 (2d, pbns, mgke, unsteady)

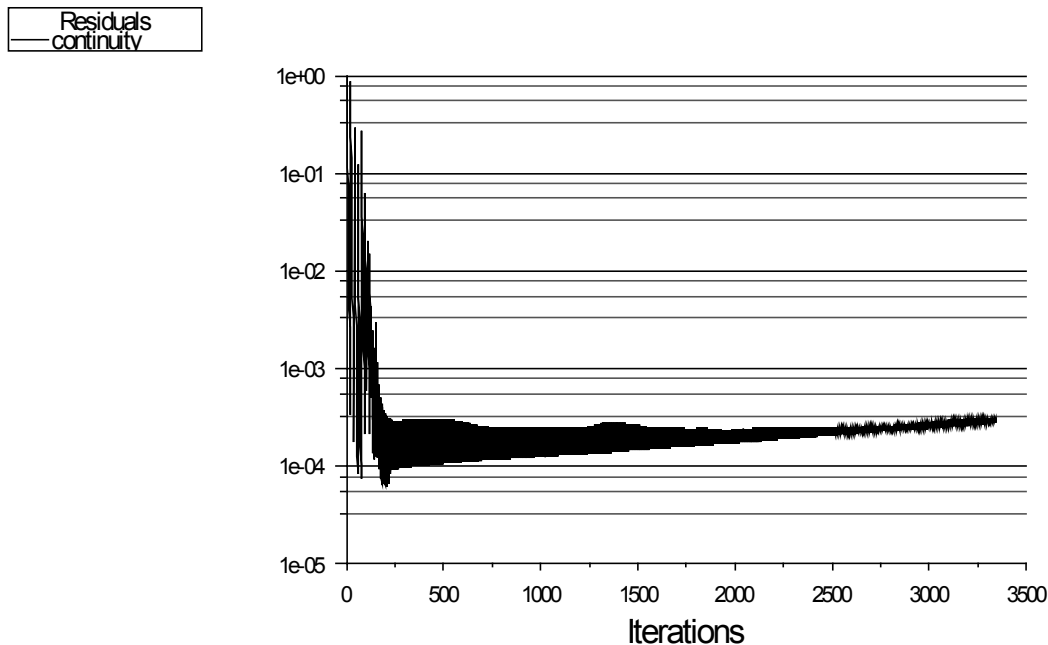
Figura 58.- Malla computacional para el análisis de sensibilidad

El paso temporal para esta simulación se reduce 4 veces. Es decir, en cada iteración se avanza en el tiempo 0.05 segundos.

Una vez hecha la simulación, se obtienen que la solución converge en cada una de los pasos temporales, como ya había ocurrido en las simulaciones anteriores. En este caso, tarda solo 3 iteraciones en converger

en cada paso temporal. En cuanto al flujo, su desarrollo y el valor de las variables si no idéntico, es muy semejante a la simulación realizada para el caso seco.

La duración de la simulación es de alrededor de 5 horas.



Scaled Residuals (Time=8.5700e+01)

Dec 02, 2009
FLUENT 6.3 (2d, pbn, mgke, unsteady)

Figura 59.- Residuos de la ecuación de continuidad para el análisis de sensibilidad.

Debido a que el presente proyecto tiene como principal misión mostrar la forma de hacer las simulaciones y ver que es posible reproducir comportamientos físicos cualitativamente se consideran válidos los resultados obtenidos.

8

Conclusiones generales

8. CONCLUSIONES GENERALES

Durante la realización del presente estudio se ha simulado el ascenso de una térmica en dos casos distintos: con aire como único fluido en el primer caso y con aire húmedo con condensación en el segundo. A la vista de los resultados, se concluye que:

- Se ha conseguido el objetivo principal del proyecto, que era conseguir modelar ambos casos de la forma que se ha hecho. En definitiva, se ha realizado una simulación coherente de un flujo compresible, transitorio, turbulento, bifásico (mezcla de gas y líquido), compuesto por varias especies (aire, vapor de agua y agua líquida), con transferencia de masa entre el vapor de agua y el agua líquida (condensación) y movido únicamente por convección libre.
- Ambas simulaciones evolucionan prácticamente a la par. Ahora bien, se puede apreciar una evolución ligeramente más rápida de la térmica húmeda a partir de que empieza a producirse la condensación, haciéndose especialmente patente en las tres últimas medidas. Esto es debido a que en el proceso de condensación, por el cambio de fase de gas a líquido, también se produce una adición de calor en forma de entalpía latente, la cual se emplea en calentar la térmica, lo que conlleva que la diferencia de densidad con su entorno sea ligeramente mayor y por lo tanto, también sean mayores las fuerzas de flotabilidad.
- El proceso de condensación está bien modelado. Funciona a la perfección, gracias a que computa en cada celda la humedad relativa.
- El problema con la térmica húmeda es válido para otras concentraciones iniciales de vapor de agua en la atmósfera. De hecho, el día elegido tiene una humedad relativamente alta. En el caso de que el día sea más “seco”, el aire alcanza condiciones de saturación a mucha altura y mucho más tarde.

- La ley que gobierna la condensación, como ya se ha comentado, ha sido frenada artificialmente al multiplicarla por un factor menor que 1. Suponiendo una atmósfera ideal en equilibrio, este factor se puede eliminar, o incluso elevarlo exponencialmente para generar una condensación prácticamente instantánea.
- La térmica en ambos casos se eleva en la atmósfera más de lo esperado. Esto puede ser debido a que la atmósfera se encuentra en reposo inicialmente, así como por motivo que la frontera derecha es un muro y no una frontera donde estén fijadas la presión y otras variables fluidas.
- El análisis de sensibilidad indica que las simulaciones están bien realizadas y los resultados no se ven afectados por disminuir el grosor de la malla y el paso temporal. No obstante, es cierto que al refinar la malla se obtiene mayor precisión en la adquisición de los datos.

9

Trabajos futuros

9. TRABAJOS FUTUROS

Desde la definición del estudio que se ha desarrollado en el presente análisis, se tuvo en cuenta que era de carácter iniciador y que posiblemente daría lugar a su continuación en otros proyectos.

A continuación se indican algunas mejoras posibles y trabajos futuros a desarrollar sobre el presente estudio:

- Modelización más real de la atmósfera, especialmente en cuanto a sus valores iniciales. En este proyecto la atmosfera se inicializó en reposo, algo que no es del todo cierto, pues es evidente que de una forma u otra siempre contiene cierta cantidad de movimiento principalmente debido al viento. A modo de idea preliminar, quizás se podría implementar en la frontera derecha algún tipo de inyección suave de aire. Previsiblemente, esto aumentaría el mezclado de la térmica con el aire colindante, frenando su ascenso y no permitiendo que se elevara hasta tanta altura. También sería interesante modelar un efecto que suele ocurrir en la atmósfera que no ha sido considerado: la inversión térmica.
- Igualmente se podrían implementar en la frontera derecha las variables fluidas correspondientes a la altura. Previsiblemente, esto mejoraría el mezclado así como un comportamiento más real de la atmósfera.
- La temperatura inicial de la térmica es relativamente alta (5°C de diferencia con el exterior). Se puede llevar a cabo un estudio más detallado al disminuir esta diferencia de temperatura a 2°C o 3°C.
- Refinar la malla para poder realizar un análisis cuantitativo más preciso de los resultados. Así mismo, realizar la simulación con discretizaciones de mayor orden para las ecuaciones, consiguiendo que la solución converja en cada pasa temporal.

- Introducir en el ascenso de la térmica un perfil aerodinámico correspondiente al de un avión ultraligero para observar su comportamiento.

10

Resumen

10. RESUMEN

El presente proyecto ha consistido en la comprensión y posterior simulación del ascenso en la atmósfera de una corriente de aire caliente. Para ello, se ha desarrollado en dos partes bien diferenciadas:

- Una primera parte en la que se trataba de entender el problema y analizar y estudiar las ecuaciones.
- Una segunda parte en la que se ha llevado a cabo la simulación de la térmica en un código comercial de mecánica de fluidos computacional (FLUENT) para dos casos distintos: para el caso de una térmica seca y para el caso de una térmica húmeda con condensación.

Para el análisis, estudio y comprensión del problema y sus ecuaciones, nos hemos basado principalmente en un artículo del 2001, en el cual su autor desarrolla un modelo muy parecido al nuestro, con la salvedad que la temperatura de la térmica es la correspondiente a una explosión (2000 K). Sobre las ecuaciones del modelo del artículo, se ha realizado un análisis de órdenes de magnitud para comprobar la aplicación de la hipótesis de Boussinesq. Pese a que es viable considerar el fluido como incompresible salvo en los términos de flotabilidad dentro de la térmica, posteriormente se comprobó durante las simulaciones que no se podía aplicar, ya que en la atmósfera sí que existen variaciones apreciables de temperatura y densidad.

La simulación se ha llevado a cabo en el código comercial FLUENT. Para ello, se ha implementado el modelo. Las características principales del flujo son: transitorio, turbulento, compresible (gas ideal), composición bifásica/humedad (fluido compuesto de aire, vapor de agua y agua líquida), movido por las fuerzas de flotabilidad, atmósfera estratificada y con transferencia de masa entre la fase gaseosa y la líquida (condensación).

El objetivo de la simulación no era el de obtener unos resultados cuantitativos muy elaborados y precisos, sino el de mostrar como implementar el problema que nos ocupa en FLUENT y ver que es posible reproducir comportamientos físicos cualitativamente.

Los resultados obtenidos del caso seco y del caso húmedo son prácticamente idénticos. Se puede apreciar un ligero aumento en la velocidad de ascenso de la térmica para el caso húmedo a partir de que se ha empezado a producir la condensación.

A modo de conclusión, los objetivos principales del proyecto se han cumplido. Se han comprendido las ecuaciones y se ha implementado un buen modelo que da resultados satisfactorios en FLUENT. Se hace especial hincapié en haber conseguido una buena simulación de la humedad y de la transferencia de masa entre el vapor de agua y el agua líquida, que era dónde residía la mayor dificultad.

11

Bibliografía

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. GAMBIT v2.2 Documentation (User guide, Modeling guide, Tutorial guide)
- [2]. FLUENT v6.3 Documentation (User guide, UDF guide, Tutorial guide)
- [3]. Apuntes de “Simulación de flujos industriales por ordenador”
- [4]. Apuntes de “Instalaciones fluidotérmicas”
- [5]. Apuntes de “Ingeniería de fluidos”
- [6]. Y. A. Dovgalyuk, M. A. Zatevakhin, and E. N. Stankova, 1993; Numerical Simulation of a Buoyant Thermal Using the k-E Turbulence Model; *Journal of applied meteorology*, volume 33
- [7]. M. A. Zatevakhin, 2001; Turbulent Thermal in a Humid Atmosphere; *High Temperature*, volume 39
- [8]. Stavros J. Karabelas, Nikolaos C. Markatos, 2007; Mathematical modeling of subsonic two-phase condensation flow around an aircraft under various flight conditions; *Journal of Computational and Applied Mechanics*, volume 8
- [9]. Turbulent Flows. Pope, Stephen B.
- [10]. Mecánica de fluidos. Liñán Martínez, Amable
- [11]. Atmosphere, Weather and Climate. Roger G. Barry and Richard J. Chorley
- [12]. Fundamentos de termodinámica técnica. Moran&Shapiro
- [13]. <http://www.ssa.org/>. Soaring Society of America
- [14]. <http://www.vueloavela.org/>. Vuelo a Vela
- [15]. <http://www.wikipedia.org/>. Wikipedia
- [16]. <http://www.cfd-online.com/>. Cfd-online

- [17]. <http://university.fluent.com/forum/>. Fluent University Forum
- [18]. <http://www.fluentusers.com/>. Fluent User Services Center
- [19]. <http://www.ansys.com/customerportal/>. Ansys Customer Portal
- [20]. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html/>. Atmospheric soundings. University of Wyoming
- [21]. <http://www.accesowok.fecyt.es/strauss.uc3m.es:8080/wos/>. ISI Web of Knowledge

12

ANEXOS

12. ANEXOS

12.1. ANEXO A: UDF

```

/*****
UDF
*****/

#include "udf.h"

DEFINE_INIT(init_func,d)
{
    cell_t c;
    Thread *t;
    real xc[ND_ND];

    /* loop over all cell threads in the domain */
    thread_loop_c(t,d)
    {

        /* loop over all cells */
        begin_c_loop_all(c,t)
        {
            C_CENTROID(xc,c,t);
            if (sqrt(ND_SUM(pow(xc[0] - 0.5,2.),
                           pow(xc[1] - 250,2.),
                           pow(xc[2] - 0.5,2.))) < 500)
                C_T(c,t) = 293.15;
            else
                C_T(c,t) = 288.15-6.5*xc[1]/1000;
        }
        {
            C_CENTROID(xc,c,t);

            C_P(c,t) = 101325*pow((1-22.557e-6*xc[1]),5.256);

        }
        end_c_loop_all(c,t)
    }
}

DEFINE_PROFILE(temperature_boundary,thread,nv)
{
    face_t f;
    real x[ND_ND];

    /* loop over each of the faces of this zone */

    begin_f_loop (f,thread)

```

```

    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        F_PROFILE(f,thread,nv)=288.15-6.5*x[1]/1000.;
    }
end_f_loop (f,thread)
}

```

```

DEFINE_PROFILE(pressure_boundary,thread,nv)

```

```

{
    face_t f;
    real x[ND_ND];

    /* loop over each of the faces of this zone */

    begin_f_loop (f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        F_PROFILE(f,thread,nv)=101325*pow((1-22.557e-6*x[1]),5.2562);
    }
    end_f_loop (f,thread)
}

```

```

DEFINE_PROFILE(h2o_mass_fraction_boundary,thread,nv)

```

```

{
    face_t f;
    real x[ND_ND];

    /* loop over each of the faces of this zone */

    begin_f_loop (f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        F_PROFILE(f,thread,nv)=(2*pow(10,-15)*pow(x[1]-2500,4)-5*pow(10,-
        11)*pow(x[1]-2500,3)+6*pow(10,-7)*pow(x[1]-2500,2)-0.0039*(x[1]-
        2500)+10.273)/2400;
    }
    end_f_loop (f,thread)
}

```

```

DEFINE_MASS_TRANSFER(condensation,cell,thread,from_index,from_species_index,
to_index, to_species_index)

```

```

{
    real rh; /* relative humidity*/
    real m_lg=0.;
    real psat, pmix, Pvapor;
    real sum_p=0.;
}

```

```

real F[8] = { -7.4192420, 2.972100e-1, -1.1552860e-1, 8.6856350e-3, 1.094098e-3, -
4.39993e-3, 2.520658e-3, -5.218684e-4 };
int i;
Thread *gas = THREAD_SUB_THREAD(thread, from_index);

sum_p = 0.0; /* Definition of relative humidity for ideal gas mixture */
pmix = C_P(cell, thread);

for(i=0; i<8; i++)
{
    sum_p = sum_p + pow(0.01*(C_T(cell, thread) - 338.15), (double) i) * F[i];
}

psat = (22.089e6)*exp(((647.286/C_T(cell, thread)) - 1.0)*sum_p);

Pvapor=C_R(cell, gas)*C_YI(cell, gas, from_species_index)*461.5*C_T(cell, thread);

rh=Pvapor/psat;

if (rh>1)
{
    m_lg=(rh-1)*0.2*C_YI(cell, gas, from_species_index)*C_R(cell, gas);
}

return m_lg;
}

```

12.2. ANEXO B: Ajuste función de humedad

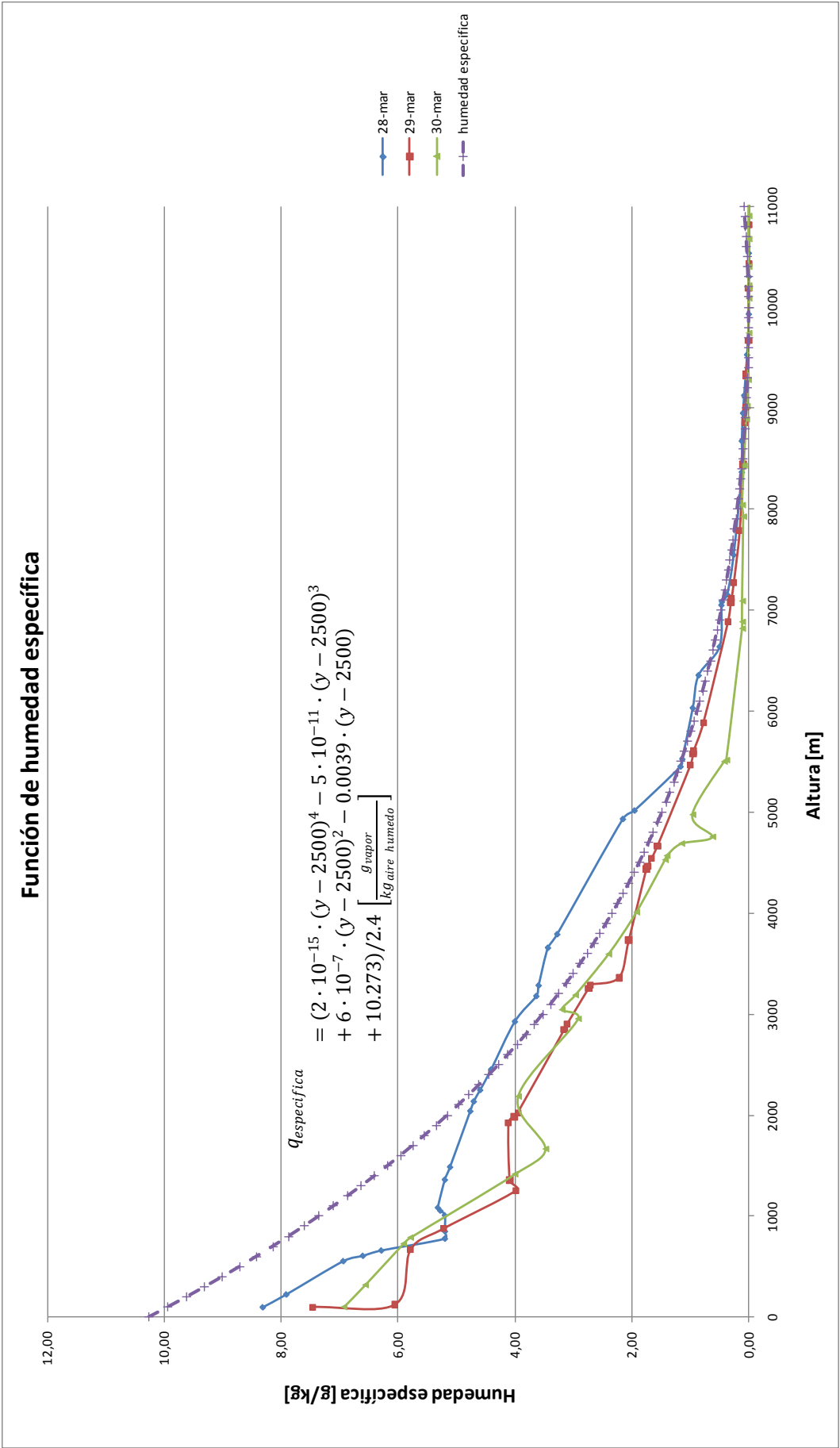
Descripción de las magnitudes representadas en cada columna:

Parameter	Description	Units
PRES:	Atmospheric Pressure	[hPa]
HGHT:	Geopotential Height	[meter]
TEMP:	Temperature	[celsius]
DWPT:	Dewpoint Temperature	[celsius]
RELH:	Relative Humidity	[%]
MIXR:	Mixing Ratio	[gram/kilogram]
SPMOISTR	Specific moisture	[gram/kilogram]

08190 Barcelona Observation at 12Z						28-mar
PRES [hPa]	HGHT [m]	TEMP [°C]	DWPT [°C]	RELH [%]	MIXR [g/kg]	SPMOISTR [g/kg]
990	98	12,6	11	90	8,39	8,32
975	225	11,4	10	91	7,98	7,92
937	555	8,2	7,5	95	6,99	6,94
931	608	8,4	6,7	89	6,65	6,61
925	661	8,6	5,9	83	6,33	6,29
912	778	9	3	66	5,23	5,20
904	851	8,9	2,9	66	5,23	5,20
887	1009	8,6	2,6	66	5,23	5,20
882	1056	9,3	2,7	63	5,31	5,28
879	1084	9,8	2,8	62	5,35	5,32
850	1362	8	2	66	5,23	5,20
837	1488	6,9	1,6	69	5,14	5,11
782	2042	1,9	-0,4	85	4,79	4,77
773	2137	1	-0,7	88	4,73	4,71
762	2251	0,4	-1,2	89	4,62	4,60
743	2453	-0,7	-2,1	90	4,43	4,41
700	2929	-3,3	-4,2	93	4,02	4,00
678	3181	-4,9	-5,9	93	3,65	3,64
669	3287	-5,1	-6,2	92	3,61	3,60
638	3660	-5,9	-7,4	89	3,45	3,44
627	3794	-6,7	-8,2	89	3,29	3,28
541	4935	-13,7	-15,3	88	2,16	2,16
535	5019	-14,3	-16,6	83	1,96	1,96
505	5455	-17,3	-23,3	60	1,17	1,17
500	5530	-17,7	-23,7	59	1,14	1,14
467	6035	-22	-26,3	68	0,96	0,96
447	6359	-24,7	-28	74	0,86	0,86
430	6641	-26,1	-34,1	47	0,5	0,50
406	7054	-30,1	-35,4	60	0,47	0,47
404	7089	-30,5	-35,5	62	0,46	0,46
400	7160	-30,7	-37,7	50	0,37	0,37
378	7553	-33,9	-41,6	46	0,26	0,26
336	8371	-40,7	-49,7	37	0,12	0,12
321	8679	-43,5	-50,5	46	0,12	0,12
308	8955	-45,6	-52,6	45	0,1	0,10
300	9130	-46,9	-53,9	45	0,08	0,08
282	9533	-49,8	-62,3	22	0,03	0,03
265	9938	-52,7	-70,7	10	0,01	0,00
250	10310	-55,1	-72,1	10	0,01	0,00
241	10543	-57,2	-73,4	11	0,01	0,00

08190 Barcelona Observation at 12Z						29-mar
PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	SPMOISTR g/kg
991	98	13,4	9,4	77	7,52	7,46
988	123	11,2	6,3	72	6,09	6,05
925	669	5,8	4,7	93	5,82	5,79
902	875	4,2	2,9	91	5,25	5,22
861	1253	3,2	-1,5	71	4	3,98
850	1357	2,4	-1,3	77	4,11	4,09
792	1924	-1,5	-2,2	95	4,13	4,11
786	1985	-1,1	-2,6	90	4,03	4,01
782	2025	-0,9	-2,9	86	3,97	3,95
705	2846	-5,2	-7,2	86	3,17	3,16
700	2902	-5,5	-7,5	86	3,12	3,11
669	3256	-8,2	-9,7	89	2,75	2,74
666	3291	-8,5	-9,9	90	2,72	2,71
660	3361	-6,5	-12,5	62	2,23	2,23
629	3732	-9,1	-14,1	67	2,06	2,06
574	4436	-14,1	-17,1	78	1,76	1,76
572	4463	-14,3	-17,2	79	1,74	1,74
566	4542	-14,8	-17,8	78	1,67	1,67
557	4662	-15,6	-18,8	77	1,57	1,57
500	5470	-21,1	-25,1	70	1	1,00
493	5574	-21,7	-25,7	70	0,96	0,96
491	5604	-21,9	-25,9	70	0,95	0,95
472	5888	-24,3	-28,5	68	0,78	0,78
411	6885	-32,8	-37,7	62	0,36	0,36
400	7080	-34,5	-39,5	60	0,31	0,31
398	7114	-34,8	-39,9	60	0,3	0,30
389	7272	-36,2	-41,5	58	0,26	0,26
361	7785	-40,9	-46,9	52	0,16	0,16
327	8442	-46,8	-52,1	54	0,1	0,10
307	8861	-50,5	-55,4	56	0,07	0,07
300	9010	-51,9	-56,9	55	0,06	0,06
286	9319	-53,8	-58,2	58	0,05	0,05
285	9341	-53,9	-58,3	58	0,05	0,05
271	9667	-51,9	-68,9	11	0,01	0,01
250	10190	-52,3	-75,3	5	0,01	0,01
241	10427	-52,2	-76,9	4	0	0,00
227	10813	-52,1	-79,5	2	0	0,00
201	11598	-51,9	-84,7	1	0	0,00

08190 Barcelona Observation at 00Z						30-mar
PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	SPMOISTR g/kg
998	98	12,2	8,4	78	6,97	6,92
972	316	10,2	7,2	82	6,6	6,56
925	724	6,4	5	91	5,94	5,90
918	786	5,8	4,6	92	5,82	5,79
850	1413	2,4	-1,6	75	4,02	4,00
824	1663	0,6	-3,9	72	3,49	3,48
772	2183	-2,9	-3,1	99	3,96	3,94
700	2952	-8,1	-8,3	98	2,93	2,92
692	3042	-7,1	-7,3	98	3,21	3,20
679	3187	-8	-8,5	96	2,98	2,97
644	3592	-10,6	-11,8	91	2,41	2,40
610	4008	-13,2	-15,2	85	1,93	1,93
570	4527	-16,4	-19,5	77	1,44	1,44
567	4568	-16,7	-19,8	77	1,41	1,41
558	4688	-17,5	-22,2	67	1,16	1,16
553	4755	-18,1	-29,1	38	0,63	0,63
537	4974	-19,7	-24,7	64	0,97	0,97
500	5500	-23,1	-34,1	36	0,43	0,43
499	5515	-23,1	-35,1	32	0,39	0,39
416	6817	-33,7	-47,7	23	0,12	0,12
412	6884	-34,3	-47,8	24	0,12	0,12
400	7090	-36,1	-48,1	28	0,12	0,12
354	7926	-43,9	-50,9	46	0,1	0,10
348	8041	-44,3	-49,3	57	0,12	0,12
328	8432	-47,5	-53	53	0,09	0,09
306	8891	-51,3	-57,3	49	0,05	0,05
300	9020	-52,1	-59,1	43	0,04	0,04
288	9282	-54,5	-64,5	28	0,02	0,02
268	9744	-53,8	-68,4	15	0,01	0,01
254	10088	-53,3	-71,3	9	0,01	0,01
250	10190	-53,5	-72,5	8	0,01	0,01
249	10216	-53,5	-72,7	8	0,01	0,01
242	10401	-53,1	-73,7	6	0,01	0,01
232	10676	-52,6	-75,3	5	0,01	0,01
224	10904	-52,2	-76,6	4	0,01	0,01
208	11385	-51,4	-79,4	2	0	0,00
200	11640	-50,9	-80,9	2	0	0,00



12.3. ANEXO C: Configuración FLUENT

FLUENT

Version: 2d, pbns, rngke, unsteady (2d, pressure-based, RNG k-epsilon, unsteady)

Release: 6.3.26

Title: **CASO SECO**

Models

Model	Settings

-	
Space	2D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	RNG k-epsilon turbulence
model	
Wall Treatment	Standard Wall Functions
RNG Differential Viscosity Model	Enabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled
Heat Transfer	Enabled
Solidification and Melting	Disabled
Radiation	None
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones

name	id	type

fluid	2	fluid
frontera_superior	3	pressure-outlet
muro_derecho	4	wall
eje_simetria	5	symmetry
suelo	6	wall
default-interior	8	interior

Boundary Conditions

fluid

Condition

Value

Material Name

air

	Specify source terms?	
no	Source Terms	
()	Specify fixed values?	
no	Fixed Values	
()	Motion Type	
0	X-Velocity Of Zone (m/s)	
0	Y-Velocity Of Zone (m/s)	
0	Rotation speed (rad/s)	
0	X-Origin of Rotation-Axis (m)	
0	Y-Origin of Rotation-Axis (m)	
0	Deactivated Thread	
no	Laminar zone?	
no	Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	
yes	Porous zone?	
no	X-Component of Direction-1 Vector	
1	Y-Component of Direction-1 Vector	
0	Relative Velocity Resistance Formulation?	
yes	Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	
0	Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	
0	Choose alternative formulation for inertial resistance?	
no	Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	
0	Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	
0	C0 Coefficient for Power-Law	
0	C1 Coefficient for Power-Law	
0	Porosity	
1	Solid Material Name	
aluminum		
	frontera_superior	
	Condition	Value

```

-----
-----
Gauge Pressure (pascal) (profile udf
pressure_boundary)
Backflow Total Temperature (k) (profile udf
temperature_boundary)
Backflow Direction Specification Method 1
X-Component of Flow Direction 1
Y-Component of Flow Direction 0
X-Component of Axis Direction 1
Y-Component of Axis Direction 0
Z-Component of Axis Direction 0
X-Coordinate of Axis Origin (m) 0
Y-Coordinate of Axis Origin (m) 0
Z-Coordinate of Axis Origin (m) 0
Turbulent Specification Method 0
Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2) 0
Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3) 0
Backflow Turbulent Intensity (%) 0.1
Backflow Turbulent Length Scale (m) 1
Backflow Hydraulic Diameter (m) 1
Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10
is zone used in mixing-plane model? no
Specify targeted mass flow rate no
Targeted mass flow (kg/s) 1

```

```

muro_derecho
Condition Value
-----
-----
Wall Thickness (m) 0
Heat Generation Rate (w/m3) 0
Material Name
aluminum
Thermal BC Type 0
Temperature (k)
(profile udf boundary_temp)
Heat Flux (w/m2) 0
Convective Heat Transfer Coefficient (w/m2-k) 0
Free Stream Temperature (k) 300
Wall Motion 0
Shear Boundary Condition 0
Define wall motion relative to adjacent cell zone? yes
Apply a rotational velocity to this wall? no
Velocity Magnitude (m/s) 0
X-Component of Wall Translation 1
Y-Component of Wall Translation 0
Define wall velocity components? no
X-Component of Wall Translation (m/s) 0
Y-Component of Wall Translation (m/s) 0
External Emissivity 1
External Radiation Temperature (k) 300
Wall Roughness Height (m) 0
Wall Roughness Constant 0.5
Rotation Speed (rad/s) 0

```

X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Surface tension gradient (n/m-k)	0
Specularity Coefficient	0

eje_simetria

Condition	Value

suelo

Condition	Value

Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (w/m3)	0
Material Name	
aluminum	
Thermal BC Type	0
Temperature (k)	
(profile udf boundary temp)	
Heat Flux (w/m2)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (w/m2-k)	0
Free Stream Temperature (k)	300
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature (k)	300
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Surface tension gradient (n/m-k)	0
Specularity Coefficient	0

default-interior

Condition	Value

Solver Controls

Equations

Equation	Solved
Flow	yes
Turbulence	yes
Energy	yes

Numerics

Numeric	Enabled
Absolute Velocity Formulation	yes

Unsteady Calculation Parameters

Time Step (s)	1
Max. Iterations Per Time Step	20

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
Pressure	0.30000001
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.69999999
Turbulent Kinetic Energy	0.80000001
Turbulent Dissipation Rate	0.80000001
Turbulent Viscosity	1
Energy	1

Linear Solver

	Solver	Termination	
Residual Reduction	Type	Criterion	
Variable			
Tolerance			
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7
Energy	Flexible	0.1	0.7

Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value
Type	PISO
Skewness-Neighbour Coupling	yes

Skewness Correction	1
Neighbour Correction	1

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	PRESTO!
Density	First Order Upwind
Momentum	First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Energy	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Material Properties

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	
Value(s)			

Density	kg/m3	ideal-gas	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	
1006.43			
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	
1.7894001e-05			
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)

Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

FLUENT

Version: 2d, pbns, mixture, spe, rngke, unsteady (2d, pressure-based, Mixture, species, RNG k-epsilon, unsteady)

Release: 6.3.26

Title: **CASO HÚMEDO**

Models

Model	Settings

-	
Space	2D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	RNG k-epsilon turbulence
model	
Wall Treatment	Standard Wall Functions
RNG Differential Viscosity Model	Enabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled
Heat Transfer	Enabled
Solidification and Melting	Disabled
Radiation	None
Species Transport	Non-Reacting
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones

name	id	type

fluid	2	fluid
frontera_superior	3	pressure-outlet
muro_derecho	4	wall
eje_simetria	5	symmetry
suelo	6	wall
default-interior	8	interior

Boundary Conditions

fluid

Condition

Value

Material Name

water-liquid

Specify source terms? no

Source Terms ()

Specify fixed values? no

```

Fixed Values                                ( )
Motion Type                                0
X-Velocity Of Zone (m/s)                   0
Y-Velocity Of Zone (m/s)                   0
Rotation speed (rad/s)                     0
X-Origin of Rotation-Axis (m)              0
Y-Origin of Rotation-Axis (m)              0
Deactivated Thread                          no
Laminar zone?                              no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone? yes
Porous zone?                               no
Porosity                                   1
Solid Material Name

```

aluminum

frontera_superior

Condition	Value
Gauge Pressure (pascal)	(profile udf
pressure_temp)	
Backflow Total Temperature (k)	(profile udf
boundary_temp)	
Backflow Direction Specification Method	1
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Turbulent Specification Method	0
Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	0
Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	0
Backflow Turbulent Intensity (%)	0.1
Backflow Turbulent Length Scale (m)	1
Backflow Hydraulic Diameter (m)	1
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

muro_derecho

Condition	Value
Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (w/m3)	0
Material Name	
aluminum	
Thermal BC Type	0
Temperature (k)	
(profile udf boundary_temp)	
Heat Flux (w/m2)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (w/m2-k)	0

Free Stream Temperature (k)	300
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature (k)	300
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Surface tension gradient (n/m-k)	0
Specularity Coefficient	0

eje_simetria

Condition	Value

suelo

Condition	Value

Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (w/m3)	0
Material Name	
aluminum	
Thermal BC Type	0
Temperature (k)	
(profile udf boundary_temp)	
Heat Flux (w/m2)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (w/m2-k)	0
Free Stream Temperature (k)	300
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature (k)	300
Wall Roughness Height (m)	0

Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)	0
X-component of shear stress (pascal)	0
Y-component of shear stress (pascal)	0
Surface tension gradient (n/m-k)	0
Specularity Coefficient	0

default-interior

Condition	Value

Solver Controls

Equations

Equation	Solved

Flow	yes
Volume Fraction	yes
Turbulence	yes
Energy	yes
aire-humedo h2o	yes

Numerics

Numeric	Enabled

Absolute Velocity Formulation	yes

Unsteady Calculation Parameters

Time Step (s)	1
Max. Iterations Per Time Step	20

Relaxation

Variable	Relaxation Factor

Pressure	0.30000001
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.69999999
Volume Fraction	0.2
Turbulent Kinetic Energy	0.80000001
Turbulent Dissipation Rate	0.80000001
Turbulent Viscosity	1
Energy	1
aire-humedo h2o	1

Linear Solver

Residual Reduction		Solver	Termination
Variable		Type	Criterion
Tolerance			

Pressure		V-Cycle	0.1
X-Momentum		Flexible	0.1 0.7
Y-Momentum		Flexible	0.1 0.7
Volume Fraction		Flexible	0.1 0.7
Turbulent Kinetic Energy		Flexible	0.1 0.7
Turbulent Dissipation Rate		Flexible	0.1 0.7
Energy		Flexible	0.1 0.7
aire-humedo h2o		Flexible	0.1 0.7

Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value

Type	PISO
Skewness-Neighbour Coupling	yes
Skewness Correction	1
Neighbour Correction	1

Discretization Scheme

Variable	Scheme

Pressure	PRESTO!
Density	First Order Upwind
Momentum	First Order Upwind
Volume Fraction	First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Energy	First Order Upwind
aire-humedo h2o	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit

Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Material Properties

Material: (air . mixture-template) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

--	Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
	Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
	Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894001e-
05	Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
	Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	0
	Reference Temperature	k	constant	298.14999
	L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
	L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
	Degrees of Freedom		constant	0
	Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method
Value(s)		

Density	kg/m3	constant
998.20001		
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant
4182		
Thermal Conductivity	w/m-k	constant
0.60000002		
Viscosity	kg/m-s	constant
0.001003		
Molecular Weight	kg/kgmol	constant
18.0152		
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant
-		
2.8584122e+08		
Reference Temperature	k	constant
298		
L-J Characteristic Length	angstrom	constant
0		
L-J Energy Parameter	k	constant
0		
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant
0		
Degrees of Freedom		constant
0		
Speed of Sound	m/s	none
#f		

Material: mixture-template (mixture)

Property	Units	Method
Value(s)		

Mixture Species		names
((h2o air) () ())		
Density	kg/m3	ideal-gas
#f		
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	mixing-law
#f		
Thermal Conductivity	w/m-k	ideal-gas-mixing-law
#f		
Viscosity	kg/m-s	ideal-gas-mixing-law
#f		
Mass Diffusivity	m2/s	constant-dilute-appx
(2.88e-05)		

```

0      Thermal Expansion Coefficient    1/k      constant
#f      Speed of Sound                  m/s      none

```

Material: nitrogen (fluid)

```

Property          Units      Method
Value(s)
-----
--
Density            kg/m3      constant    1.138
Cp (Specific Heat) j/kg-k     constant    1040.67
Thermal Conductivity w/m-k     constant    0.0242
Viscosity          kg/m-s     constant    1.663e-
05
Molecular Weight   kg/kgmol   constant    28.0134
Standard State Enthalpy j/kgmol   constant    0
Reference Temperature k          constant    298.15
L-J Characteristic Length angstrom   constant    3.621
L-J Energy Parameter k          constant    97.53
Thermal Expansion Coefficient 1/k       constant    0
Degrees of Freedom          constant    0
Speed of Sound          m/s       none       #f

```

Material: oxygen (fluid)

```

Property          Units      Method
Value(s)
-----
--
Density            kg/m3      constant    1.2999
Cp (Specific Heat) j/kg-k     constant    919.31
Thermal Conductivity w/m-k     constant    0.0246
Viscosity          kg/m-s     constant    1.919e-
05
Molecular Weight   kg/kgmol   constant    31.9988
Standard State Enthalpy j/kgmol   constant    0
Reference Temperature k          constant    298.15
L-J Characteristic Length angstrom   constant    3.458
L-J Energy Parameter k          constant    107.4
Thermal Expansion Coefficient 1/k       constant    0
Degrees of Freedom          constant    0
Speed of Sound          m/s       none       #f

```

Material: (water-vapor . mixture-template) (fluid)

```

Property          Units      Method      Value(s)
-----
--
Cp (Specific Heat) j/kg-k     constant    2014
Thermal Conductivity w/m-k     constant    0.0261
Viscosity          kg/m-s     constant    1.34e-05
Molecular Weight   kg/kgmol   constant    18.01534
Standard State Enthalpy j/kgmol   constant    -
2.418379e+08

```


Reference Temperature	k	constant	298.15
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	2.605
L-J Energy Parameter	k	constant	572.4
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: water-vapor (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	ideal-gas	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	2014
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0261
Viscosity	kg/m-s	constant	1.34e-
05			
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	
18.015341			
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-
2.418379e+08			
Reference Temperature	k	constant	
298.14999			
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	2.605
L-J Energy Parameter	k	constant	572.4
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	ideal-gas	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	
1006.43			
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	
1.7894001e-05			
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	0
Reference Temperature	k	constant	
298.14999			
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	2719

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4